



System Laptev-See Polynja II
Eurasische Schelfmeere im Umbruch
Ozeanische Fronten und Polynjasysteme in der Laptev-See
Schlussbericht FKZ 03G0759



**BMBF-Verbundvorhaben System Laptev-See Polynja II:
Eurasische Schelfmeere im Umbruch –
Ozeanische Fronten und Polynjasysteme in der Laptev-See**

Abschlussbericht 2012

Förderkennzeichen: 03G0759

Laufzeit: 1.4.2010 bis 31.12.2012

Antragsteller:	Teilprojekt 1	Dr. Heidemarie Kassens GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel Gebäude Ostufer Wischhofstr. 1-3, Geb. 4 24148 Kiel hkassens@geomar.de
	Teilprojekt 2	Dr. Jens Hölemann Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung Am Handelshafen 12 27570 Bremerhaven Jens.Hoelemann@awi.de
	Teilprojekt 3	Dr. Robert F. Spielhagen Akademie der Wissenschaften und der Literatur Mainz c/o GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Gebäude Ostufer Wischhofstr. 1-3, Geb. 4 24148 Kiel rspielhagen@geomar.de
	Teilprojekt 4	Univ.-Prof. Dr. Günther Heinemann Universität Trier Fachbereich VI, Klimatologie Behringstr. 21 (Campus II) 54286 Trier heinemann@uni-trier.de
	Koordination	Dr. Heidemarie Kassens Sekretariat System Laptev-See, GEOMAR

INHALTSVERZEICHNIS

Liste der verwendeten Abkürzungen und Akronyme

I. SCHLUSSBERICHT – KURZE DARSTELLUNG	1
Aufgabenstellung des Verbundvorhabens.....	1
Voraussetzungen des Verbundvorhabens.....	3
Planung und Ablauf des Verbundvorhabens	4
Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Projektbeginn	12
Zusammenarbeit mit anderen Stellen	13
II. SCHLUSSBERICHT – EINGEHENDE DARSTELLUNG	17
TP 1A: Jahreszeitliche und räumliche Variabilität von ozeanographischen Fronten und Transportprozessen	17
TP 1B: Koordination	27
TP 2: Reaktionen der Polynja-Systeme auf veränderte Antriebsgrößen	35
TP 3: Isotopengeochemische Signaturen – Wassermassenbildung für den Arktischen Ozean	51
TP 4: Änderungen von systemsteuernden Prozessen und Abläufen	63
III. ERFOLGSKONTROLLBERICHT	95
Beitrag der Ergebnisse zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms	95
Wissenschaftlicher und technischer Erfolg des Verbundvorhabens	95
Einhaltung des Finanzierungs- und Zeitplans	96
Verwertbarkeit der Ergebnisse	96
Erfindungen und Schutzrechte	97
Ungelöste Arbeitsansätze	97
IV. ZITATE.....	99
V. ANHANG.....	103
A – Veröffentlichungen der Projektmitarbeiter	
B – Liste der Diplom- und Doktorarbeiten	
C – Kurzfassungen der Diplom- und Doktorarbeiten	
D – Ehrungen und Auszeichnungen der Projektmitarbeiter	
E – Gastaufenthalte	
F – Liste der Forschergruppen	
G – Berichte der Forschergruppen	
H – Presseberichte, Fernseh- und Hörfunkbeiträge	

Liste der verwendeten Abkürzungen und Akronyme

AARI	Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg
ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
AL-Polynja	Anabar-Lena-Polynja
AMSR-E	Advanced Microwave Scanning Radiometer – Earth Observing System
ASAR	Advanced Synthetic Aperture Radar
ASR	Arctic System Reanalysis
AWI	Stiftung Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in der Helmholtz-Gemeinschaft
AWS	Automatische Wetterstation
AZW	Atlantisches Zwischenwasser
C00/10	COSMO-Modell mit 0/10cm Dünneisdicke in den Polynjen
COSMO	Consortium for Small Scale Modeling
CTD	Conductivity Temperature Depth Meter
DOE	Department of Energy
DWD	Deutscher Wetterdienst
ECMWF	European Centre for Medium Range Weather Forecasts
ENVISAT	Environmental Satellite (Umweltsatellit der Europäischen Raumfahrtagentur ESA)
ERA	ECMWF reanalysis
ETH	Eidgenössische Technische Universität Zürich
FESOM	Finite Element Sea Ice Ocean Model
GME	Globalmodell des Deutschen Wetterdienstes
EM-Bird	Electromagnetic Bird
IFM-GEOMAR	Leibniz-Institut für Meereswissenschaften an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
IPY	International Polar Year
ISI	Information Sciences Institute
LHW	Low Halocline Water
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NAOSIM	North Atlantic – Arctic Ocean – Sea-Ice Model
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NET-Polynja	Nordost-Taimyr- Polynja
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OSL	Otto-Schmidt-Labor für Polar- und Meeresforschung, St. Petersburg
OSW	Outer Shelf Waters
PANGAEA	Open Access Informationssystem des AWI
POMOR	Masterstudiengang für Polar- und Meereswissenschaften
SHL	Shelf Halocline Layer
SMOS	Soil Moisture Ocean Salinity
SSM/I	Special Sensor Microwave Imager
TIT	Thin ice thickness
TP	Teilprojekt
T-Polynja	Taimyr-Polynja
WNS-Polynja	West-Neusibirische Polynja

I. SCHLUSSBERICHT – KURZE DARSTELLUNG

Aufgabenstellung des Verbundvorhabens

Die Arktis spielt eine wichtige Rolle im Klimageschehen unserer Erde, da diese Region das globale Klima aktiv beeinflusst. Mit zunehmender Besorgnis wird deshalb beobachtet, dass das Ausmaß und die Geschwindigkeit des Klimawandels in der Arktis während der letzten Jahre stark zugenommen haben, und Prognosen zeigen, dass sich dieser Vorgang über Rückkopplungsprozesse beschleunigen wird. Dies wird besonders die sibirischen Schelfmeere betreffen.

Von zentraler Bedeutung für die Meereisproduktion und das Ökosystem der arktischen Schelfmeere sind offene Wasserflächen, die sogenannten Polynjasysteme, die sich in den Wintermonaten entlang der Küsten zwischen Festeis und Packeis bilden (Abb. 1). Sie reagieren sehr sensibel und schnell auf Veränderungen in der ozeanischen und atmosphärischen Zirkulation und können somit als Modell dafür herangezogen werden, wie sich die klimatischen Veränderungen auf die Arktis auswirken werden.

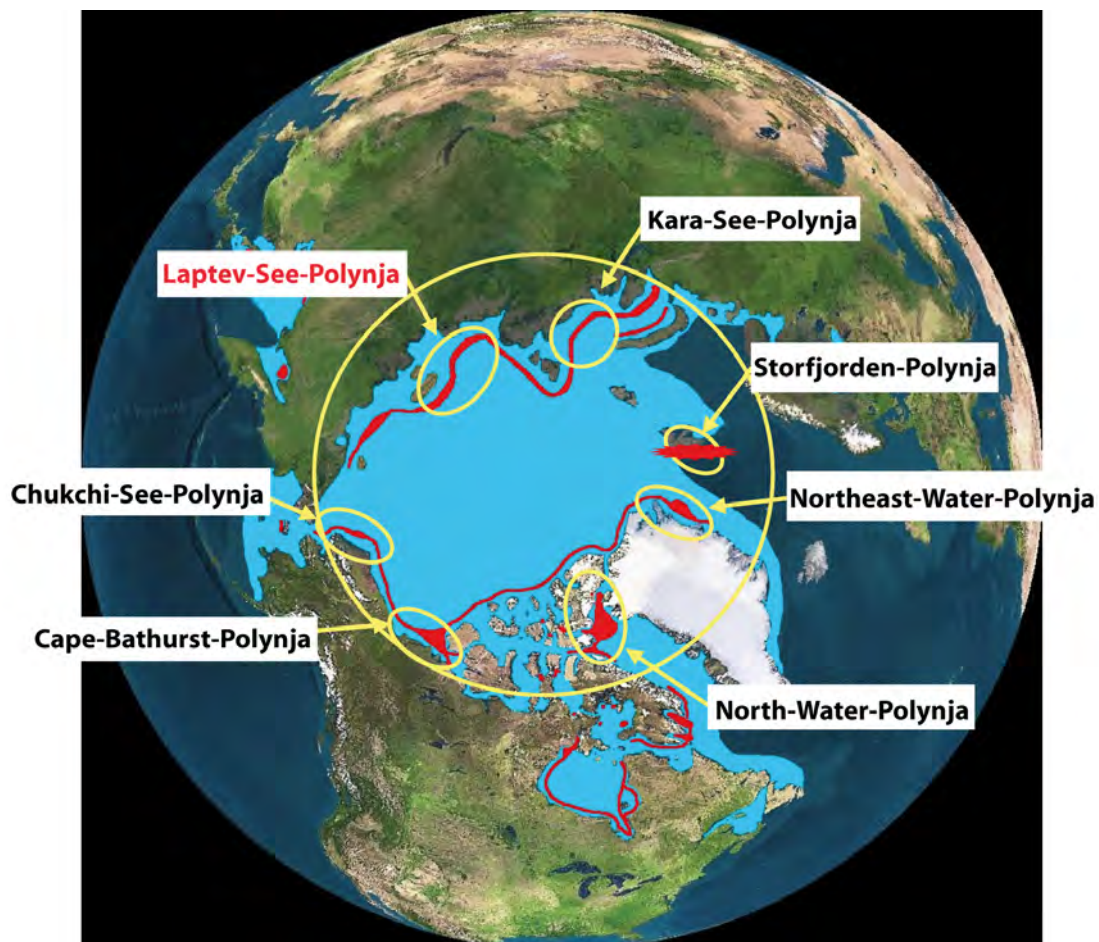


Abb. 1: Polynjasysteme im Arktischen Ozean.

Im Rahmen des russisch-deutschen Verbundvorhabens „System Laptev-See Polynja II: Eurasische Schelfmeere im Umbruch – Ozeanische Fronten und Polynjasysteme in der Laptev-See“ sollten Polynja- und Frontensysteme am Beispiel der Laptev-See studiert werden (Abb. 2). Erste Auswirkungen der aktuellen klimatischen Veränderungen auf die Fronten- und Polynjasysteme sollten erfasst und die Folgen für die globale Klimaentwicklung aufgezeigt werden. Zentrale Fragestellungen waren dabei:

- Welchen Beitrag leistet die Laptev-See-Polynja zur Eisbilanz des Arktischen Ozeans?
- Wie stabil ist das Festeis in der Laptev-See?
- Inwiefern hat sich das Umweltsystem in der Laptev-See verändert und haben diese Veränderungen nachhaltige Auswirkungen?

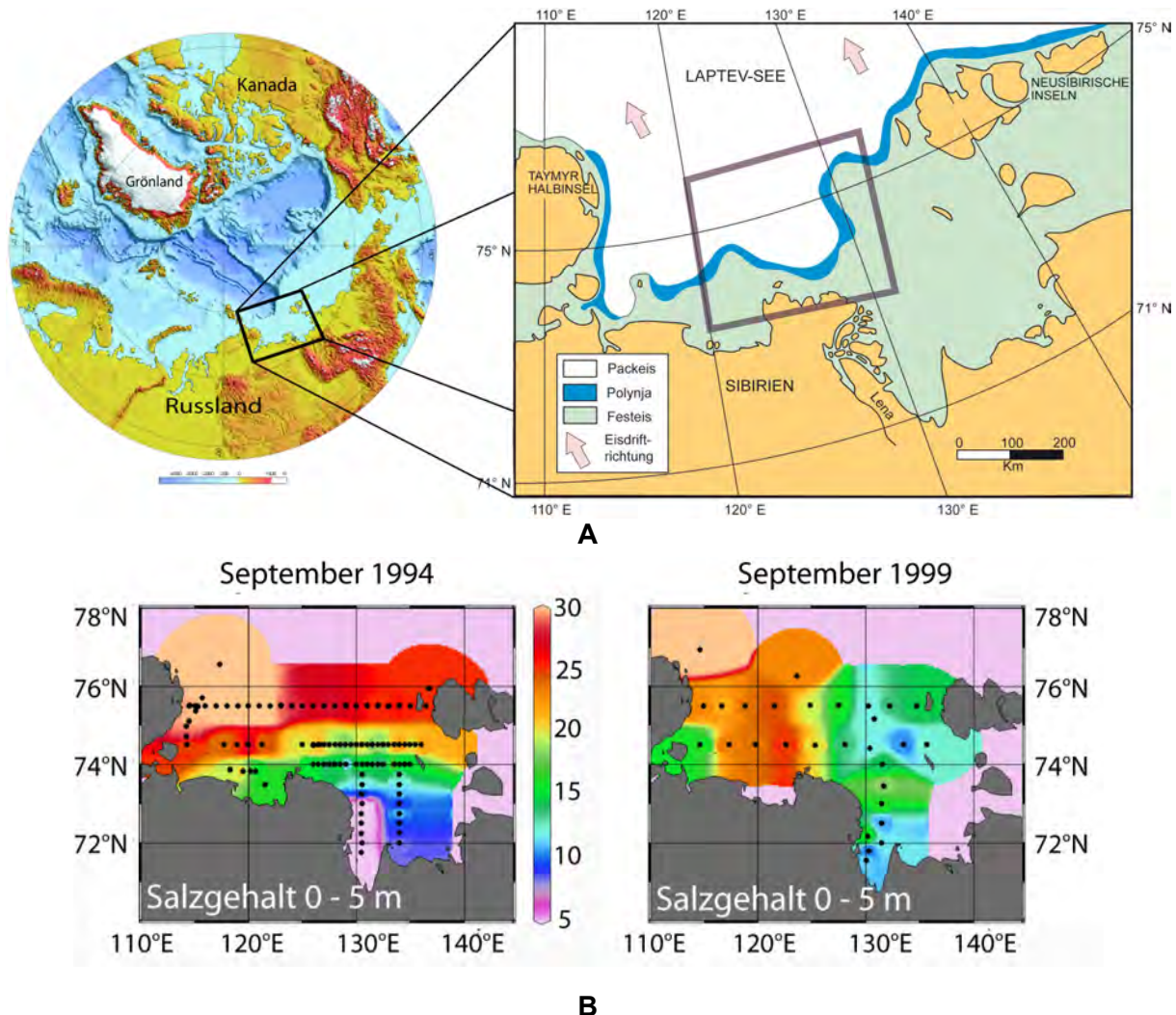


Abb. 2: A: Die Forschungsarbeiten im Rahmen des russisch-deutschen Verbundvorhabens wurden in der Laptev-See-Polynja nördlich des Lena-Deltas durchgeführt; B: Frontensysteme in der Laptev-See im September 1994 und 1999. Dargestellt ist die Verteilung der Salzgehalte im Oberflächenwasser.

Das bilaterale Verbundprojekt umfasst in Deutschland vier Teilprojekte und das Sekretariat

„System Laptev-See“ mit Schwerpunkt Koordination. Die Aufgaben des Verbunds können wie folgt zusammengefasst werden:

- Teilprojekt 1: Erfassung der Gründe für die Überschätzung der Meereisproduktion anhand von ozeanographischen Daten, der Ausbreitung von warmen, aus dem Atlantik stammenden Wassermassen in der Laptev-See und ihrer Auswirkungen auf Meereisproduktion und Ökosystem; Erfassung der Auswirkungen der veränderten ozeanischen Randbedingungen in den letzten drei Jahren auf das Sedimentbudget und auf die Verteilung von Schweb- und Nährstoffen im Gebiet des Laptev-See-Schelfes;
- Teilprojekt 2: Untersuchung der Auswirkungen des atmosphärischen und ozeanischen Antriebs auf die Eisbildung und die Entwicklung des Festeises in der Laptev-See sowie der Bedeutung der Meereisbedeckung und des küstennahen Festeises für die ozeanische Zirkulation und für den Stoff- und Energietransport auf dem Laptev-See-Schelf;
- Teilprojekt 3: Untersuchung der Bildung der für die arktische Halokline relevanten Wassermassen in der Laptev-See-Polynja und deren Veränderung nach 2007 sowie Identifizierung der steuernden Prozesse der Wassermassenverteilung und -bildung in der Laptev-See durch Vergleich mit atmosphärischen Antriebsdaten und insbesondere mit dem Transport von advektierten Wasserkörpern;
- Teilprojekt 4: Langzeitbeobachtung von Polynjen und Eisproduktion mittels hochauflösender passiver Fernerkundung für die letzten dreißig Jahre sowie Verbesserung des Verständnisses und der Quantifizierung von Polynjaprozessen und Eisproduktion für den rezenten Klimawandel mittels hochauflösender Meereis/Ozean/Atmosphären-Modellierung.

Voraussetzungen des Verbundvorhabens

Die Antragsteller verfügten bei Antragstellung über langjährige Erfahrungen in der Polarforschung, insbesondere in der Zusammenarbeit mit Russland. So besteht schon seit Beginn der 1990er Jahre eine enge Kooperation mit den russischen Partnereinrichtungen, und unter dem Schirm des russisch-deutschen Forschungsprogramms „System Laptev-See“ wurden die Vorläuferprojekte, z. B. „Prozessstudien zur Dynamik des Permafrostes in der Laptev-See“ (BMBF-Vorhaben 03G0589), erfolgreich realisiert. Geprägt wurden die Forschungsarbeiten durch gemeinsame Expeditionen und Kongresse, woraus eine enge wissenschaftliche Partnerschaft zwischen den Wissenschaftlern aus Deutschland, Russland und der Republik Sacha gewachsen war. Als Basis hierfür diente seit seiner Gründung im Jahr 1999 das

russisch-deutsche Otto-Schmidt-Labor für Polar- und Meeresforschung (OSL) in Sankt Petersburg (vgl. BMBF-Verhaben 03PL037A, 03PL038A und 03PL040A).

Erste wissenschaftliche Erfahrungen in dem logistisch schwer erreichbaren Gebiet der Laptev-See-Polynja hatten die Antragsteller bereits zu Beginn der 1990er Jahre sammeln können. Unter schwierigsten Bedingungen war es z. B. 1999 erstmals gelungen, von einem Schlauchboot aus ozeanographische Messungen entlang eines knapp 100 m langen N-S verlaufenden Schnitts vom Festeis in den Randbereich der Polynja aufzuzeichnen. Aufbauend auf diesen wichtigen Felderfahrungen wurde mit dem Verbundvorhaben eine neue und effiziente Arbeitsstrategie entwickelt, damit die geplanten Forschungsarbeiten durchgeführt werden konnten.

Das Verbundvorhaben war eingebunden in das russische Partnerprojekt „System Laptev-See: Ozeanische Fronten und Polynjasysteme in der Laptev-See“ unter Federführung des Arctic and Antarctic Research Institute (AARI), das vom russischen Ministerium für Bildung und Wissenschaft gefördert wurde.

Darüber hinaus war das Verbundvorhaben zentraler Bestandteil des internationalen Wissenschaftsplans für die Arktis ICARP II (Second International Conference on Arctic Research Planning).

Planung und Ablauf des Verbundvorhabens

Die Zielsetzung des russisch-deutschen Verbundvorhabens sollte in einem fächerübergreifenden Arbeitsprogramm realisiert werden. An den Forschungsarbeiten waren Fernerkundler, Meteorologen, Ozeanographen, Physiker, Meereschemiker, Biologen, Klimamodellierer und Paläo-Ozeanographen von deutscher und russischer Seite beteiligt, deren Arbeitsansätze eng miteinander verknüpft waren. Wissenschaftliche und logistische Schnittstellen waren das Sekretariat „System Laptev-See“ in Kiel (TP 1B) und das OSL in St. Petersburg. Über das OSL wurden auch Studierende des Masterstudiengangs für Polar- und Meereswissenschaften POMOR in die Projektarbeiten eingebunden. Darüber hinaus wurden die gemeinsame Auswertung und Interpretation durch Aufenthalte russischer Gastwissenschaftler an den deutschen Partnereinrichtungen gestützt und ausgebaut.

Das Forschungsgebiet war die Laptev-See-Polynja nördlich des Lena-Deltas (Abb. 3). Diese Region wurde ausgewählt, weil u. a. ein außergewöhnlicher Vergleichsdatensatz aus ozeanographischen, meereschemischen und biologischen Untersuchungen vorlag. Außerdem werden die Umweltbedingungen in dieser Region durch eine N-S verlaufende ozeanographi-

sche Front geprägt, die die östliche Laptev-See, deren ozeanographische, biologische und meereschemische Eigenschaften durch den Flusswasserausstrom der Lena beeinflusst werden, deutlich von der durch Wassermassen aus der Arktis und der Karasee geprägten westlichen Laptev-See abgrenzt (vgl. Abb. 2).

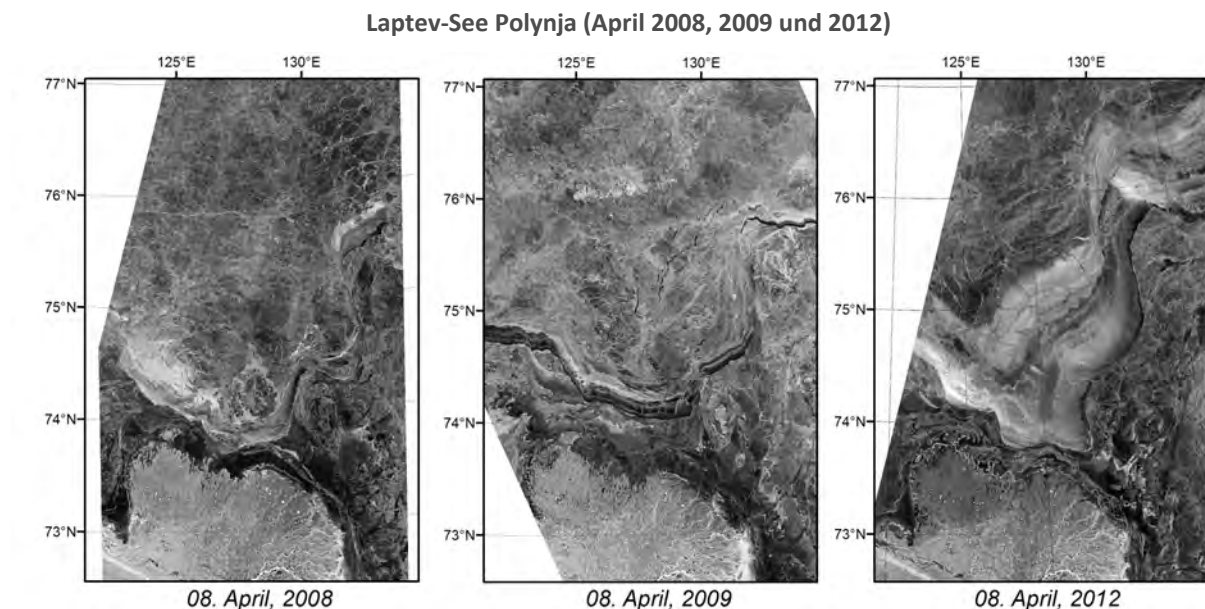


Abb. 3: ENVISAT-Satellitenbilder der Laptev-See-Polynja am 8. April 2008, 2009 und 2010.

Im Verbundvorhaben wurden umfangreiche interdisziplinäre Feldstudien in der Laptev-See durchgeführt. In der zentralen und nördlichen Laptev-See zeichneten Meeresobservatorien durchgehend Temperatur, Salzgehalt, Strömung und Trübe in der Wassersäule auf. Zwei Sommer- und eine Winterexpeditionen geben einen tiefen Einblick in die Variabilität des Biogeosystems auf verschiedenen Zeitskalen.

- Schiffsexpeditionen (TRANSDRIFT XVII und XIX; Abb. 4, 5)

In den Monaten August und September der Jahre 2010 und 2011 wurden wie geplant die Sommerexpeditionen mit den russischen Forschungsschiffen NIKOLAY EVGENOV und YAKOV SMIRNITSKY durchgeführt. Es wurden mehrere Meeresobservatorien für ein Jahr verankert und jeweils in den Folgejahren überprüft und erneut ausgesetzt (zu den Einzelheiten vgl. den ausführlichen Bericht des Teilprojektes 1B). Außerdem wurden ozeanographische, meereschemische, biologische und sedimentologische Studien im Polynja-Gebiet in drei aufeinanderfolgenden Jahren durchgeführt.

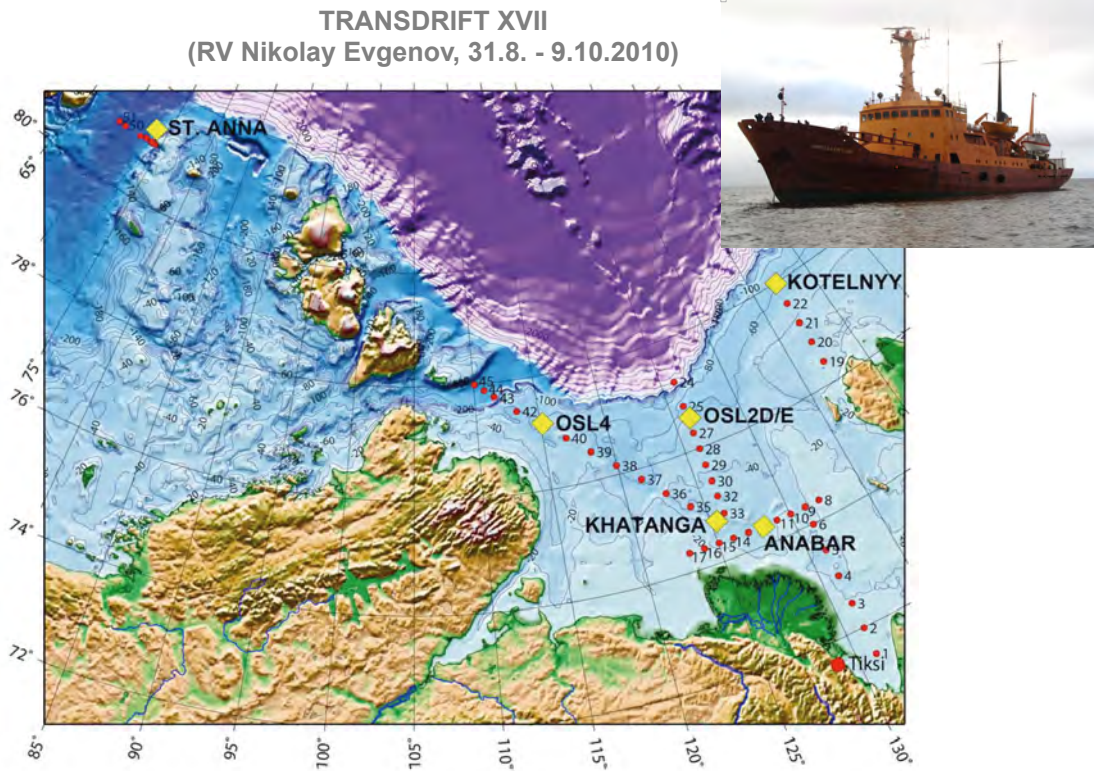


Abb. 4: Die Stationen der Expedition TRANSDRIFT XVII mit FS NIKOLAY EVGENOV sowie die Positionen der Meeresobservatorien. Rote Punkte: Stationen, gelbe Punkte: Meeresobservatorien.

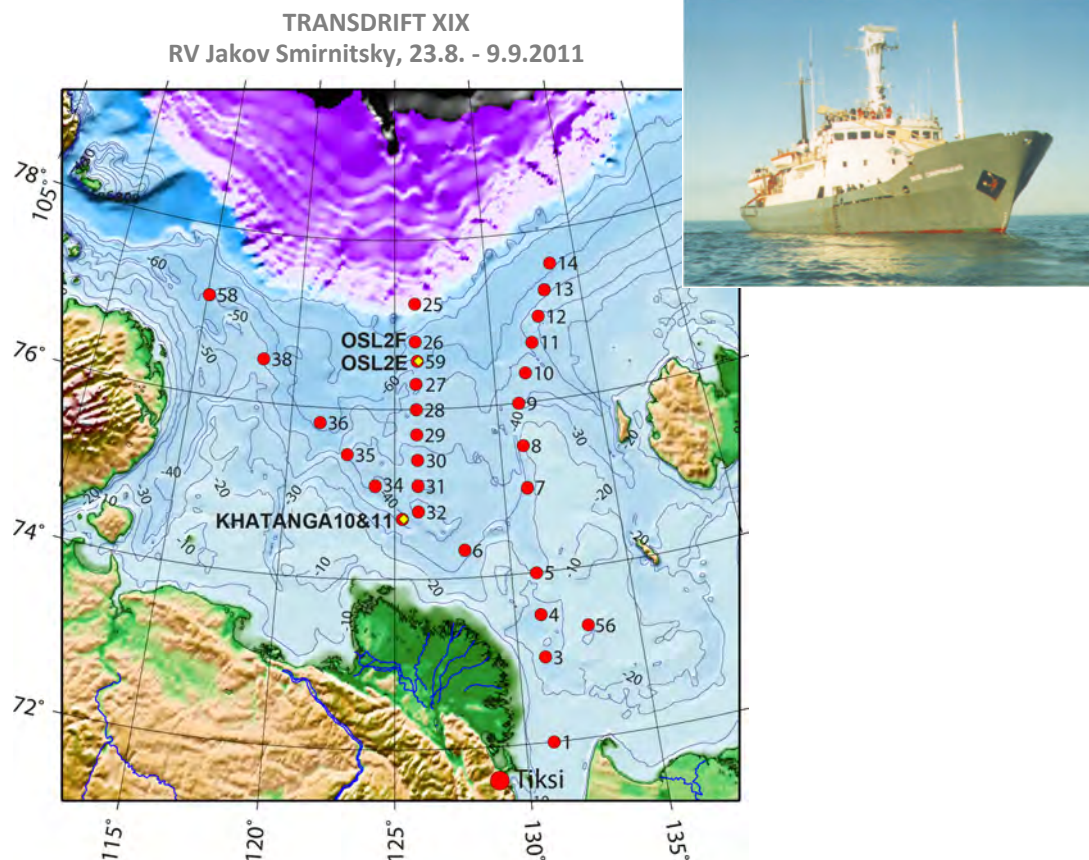


Abb. 5: Die Stationen der Expedition TRANSDRIFT XIX mit FS JAKOV SMIRNITSKY sowie die Positionen der Meeresobservatorien. Rote Punkte: Stationen, gelbe Punkte: Meeresobservatorien.

- Winterexpedition (TRANSDRIFT XX; Abb. 6)

Die für März/April 2011 geplante Expedition TRANSDRIFT XVIII konnte nicht wie geplant im Jahr 2011 durchgeführt werden. Die Einfuhr der deutschen Expeditionsausrüstung nach Russland wurde durch neue, ab dem 28.02.2011 in Kraft getretene Vorgaben des russischen Zolls erschwert. Dadurch erfolgte die Freigabe der deutschen Expeditionsfracht zu spät für den unaufschiebbaren Charterflug von Sankt Petersburg nach Tiksi. Da die Expedition von zentraler Bedeutung für die erfolgreiche Durchführung des Verbundvorhabens war, wurde ein Antrag auf kostenneutrale Verlängerung des Vorhabens bis zum 31.12.1012 gestellt und bewilligt. Die Expedition wurde unter der Bezeichnung TRANSDRIFT XX im März/April 2012 nachgeholt.

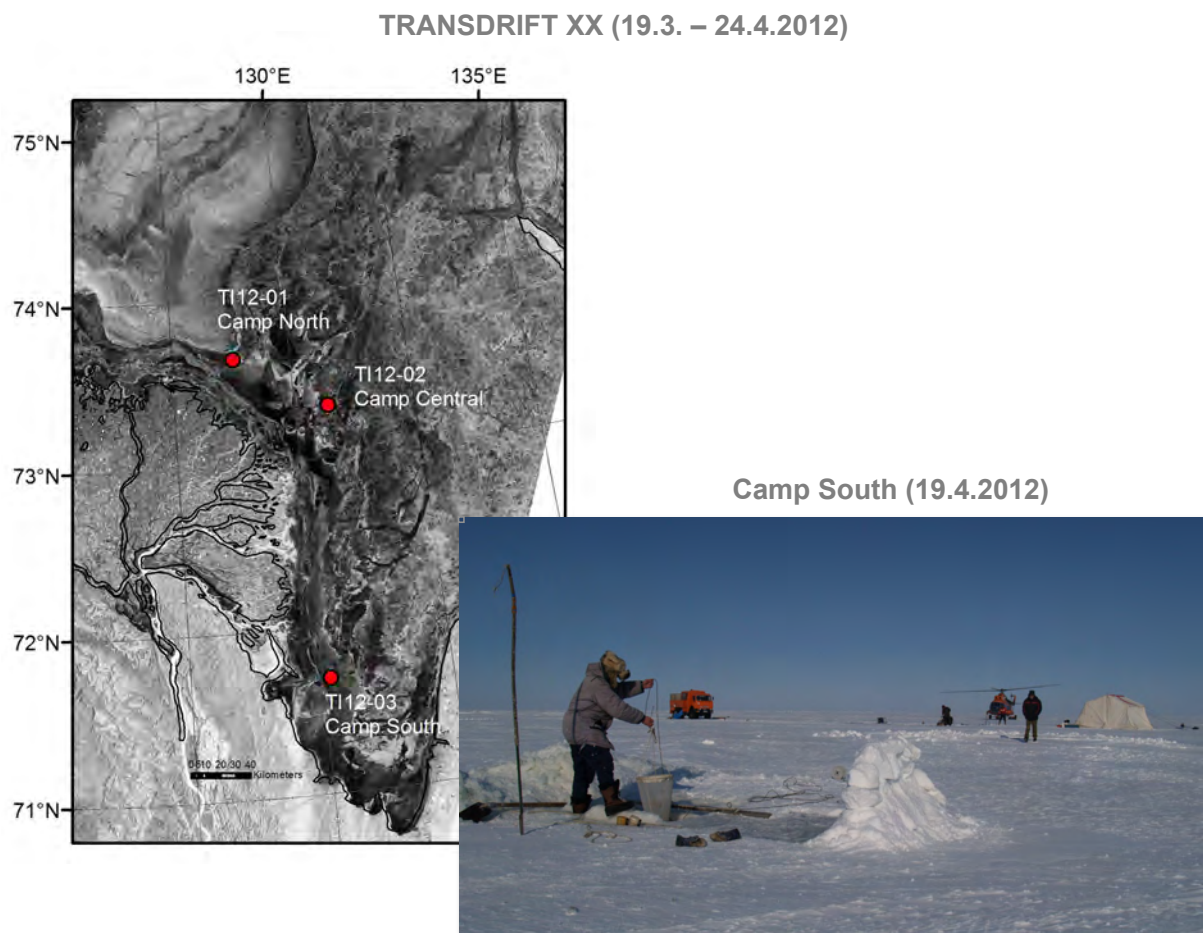


Abb. 6: Die Stationen der Winterexpedition TRANSDRIFT XX.

Im Winter 2012 wurde die mehrwöchige helikoptergestützte Expedition TRANSDRIFT XX zur Laptev-See-Polynja erfolgreich durchgeführt. Östlich und nördlich des Lena-Deltas wurden auf dem Festeis drei vierwöchige Eiscamps eingerichtet, um meteorologische, ozeanographische, meereschemische, biologische und sedimentologische Messungen durch-

zuführen. Außerdem wurden Hubschraubermessflüge und ein umfangreiches eisphysikalisches Messprogramm durchgeführt, um die Stabilität und die Mächtigkeit des Meereises zu bestimmen. Zwei Kurzzeitobservatorien im nördlichen und im zentralen Eiscamp waren drei bzw. vier Wochen im ununterbrochenen Einsatz.

Zur Vorbereitung der Expeditionen sowie zur Abstimmung der Forschungsarbeiten und zum Austausch der Ergebnisse wurden zwei nationale und zwei bilaterale Arbeitstreffen durchgeführt. Im Dezember 2012 fand zur gemeinsamen Synthese der Ergebnisse das 10. Arbeitstreffen „Russisch-deutsche Zusammenarbeit: System Laptev-See“ statt.

Insgesamt konnte das Arbeitsprogramm entsprechend der Planung erfolgreich umgesetzt werden.

Mit den Messkampagnen wurden die Verbundpartner Zeugen des rapiden Klimawandels in der Laptev-See in den Jahren 2007 bis 2012. Erste Auswirkungen des Wandels auf die Laptev-See-Polynja wurden erfasst, und erstmals wurden mit Modellen realitätsnahe Simulationen zur Öffnung und Schließung der Polynja und zur Eisdrift durchgeführt. Eine Zusammenfassung der wissenschaftlichen Ergebnisse der Teilprojekte folgt.

- TP 1A: Jahreszeitliche und räumliche Variabilität von ozeanographischen Fronten und Transportprozessen

Im Rahmen dieses Teilprojektes sollten die Auswirkungen der veränderten Randbedingungen (z. B. Rückgang der sommerlichen Meereisbedeckung) seit 2007 auf die Meereisproduktion, den Wärme- und Salztransport und auf die Schwebstoffdynamik der Laptev-See mit Hilfe von Langzeitmessungen, detaillierten Feldmessungen und einem modellierenden Ansatz untersucht werden. Der mögliche Einstrom von durch atlantisches Zwischenwasser beeinflussten Wassermassen (OSW: Outer Shelf Waters) auf den Laptev-See-Schelf wurde durch die im Verbundvorhaben durchgeführten Wintermessungen untersucht und in Zusammenschau mit dem historischen Datensatz der russischen Partner vom AARI ausgewertet. Langzeitdatensätze der Jahre 1932-2008 über die Temperatur- und Salzgehaltsverteilung auf dem Laptev-See-Schelf geben Hinweise auf eine Erwärmung des bodennahen Wasserkörpers vom äußeren Schelfbereich bis auf den mittleren Schelf. Das episodische Einstürmen von OSW auf den mittleren Laptev-See-Schelf kann die Abschätzung der Meereisproduktion mit Hilfe der Salzgehaltsbeobachtungen maßgeblich verfälschen.

Es konnte eine klare Kopplung zwischen der unterschiedlichen Oberflächenverteilung der

Flusswasserlinse der Lena und der Schwebstoffdynamik in der gesamten Wassersäule festgestellt werden. In Sommern (2007, 2009) mit einem ostwärts gerichteten Transport des Flusswassers kam es zu einer starken Zunahme der oberflächennahen Schwebstoffkonzentration auf dem südöstlichen, inneren Schelf und gleichzeitig zu einem Anstieg im bodennahen Transport auf dem gesamten östlichen Schelf. Wird die Flusswasserlinse nach Norden transportiert (2008, 2010), ist der oberflächennahe Transport erhöht, jedoch verringert sich der Schwebstofftransport in Bodennähe.

Um Transportprozesse auch während der Zeit der Eisbedeckung zu modellieren, wurde ein gekoppeltes thermodynamisches Meereis/Ozean-Modell in Zusammenarbeit mit der russischen Forschergruppe „Modellierung“ und TP 4 auf der Grundlage eines bestehenden AARI-Ozeanmodells und eines Meereismodells entwickelt. Dieses Modell ist in der Lage, die Strömungen, die Meereiszirkulation und die Verteilung von Meereis in der Laptev-See zu reproduzieren. Dies bildet die Grundlage, um erstmalig die Sedimentdynamik während der Zeit der Eisbedeckung zu modellieren.

- TP 2: Reaktionen der Polynjasysteme auf veränderte Antriebsgrößen

Es konnte geklärt werden, warum Berechnungen der Eisproduktions- und Eistransportraten in der Laptev-See zum Teil erheblich voneinander abwichen und kein übereinstimmendes Bild ergaben. So zeigte der Vergleich von Mess- und Fernerkundungsdaten, dass die Eisproduktionsrate in Eisrinnen von den satellitengestützten Methoden unterschätzt wird. Die Kombination von Satellitendaten und Feldmessungen zeigte jedoch eine gute Übereinstimmung mit der in gekoppelten Eis/Ozean-Modellen berechneten Eisproduktion.

Durch ozeanographische Messungen im Winter konnte gezeigt werden, dass an der Festeiskante eine verstärkte Durchmischung der Wassersäule auftritt, die zu starken horizontalen Temperatur- und Salzgehaltsgradienten führt. Diese kleinräumigen dynamischen Prozesse im Bereich der Festeiskante erlauben es nicht, aus punktuellen Beobachtungen der Änderung des Salzgehaltes Rückschlüsse auf die Eisproduktion innerhalb der Polynja zu ziehen. Dies erklärt die Abweichungen zwischen dem durch numerische Modelle berechneten Anstieg des Salzgehaltes in Folge der Neueisbildung von dem tatsächlich an der Festeiskante gemessenen Salzgehaltsanstieg.

Es zeigte sich, dass die auftretende jährliche Schwankung der Ausdehnung des Festeises im Wesentlichen von Starkwindereignissen verursacht wird. Starke, ablandige Winde zum Winteranfang fördern das dynamische Eisdickenwachstum (Eisdeformation). Eine starke Eis-

deformation begünstigt wiederum das Aufsetzen von Eistrücken in flachen, offshore gelegenen Schelfbereichen. Die so gebildeten Eisinseln schränken dann die Bewegung im umliegenden frei driftenden Packeis stark ein, so dass sukzessiv eine geschlossene Festeisdecke entsteht. Für den Zeitraum von 2003 bis 2011 konnte jedoch kein signifikanter Trend in der Festeisausdehnung festgestellt werden.

Die Daten der Meeresobservatorien führten zu einem neuen Verständnis von Zirkulations- und Mischungsprozessen und deren Abhängigkeit von der Eisbedeckung. Die ganzjährig dominierenden Transportprozesse auf dem Laptev-See-Schelf sind windgetrieben. Winde treiben im Sommer die horizontalen Strömungen an und sorgen im Zusammenspiel mit den Gezeitenströmungen für eine vertikale Mischung des Wasserkörpers. Im Winter – bei Eisbedeckung – verursachen die Winde eine Bewegung des Eises, dessen Impuls auf die obere Wasserschicht übertragen wird. Dadurch entsteht unter dem Eis ebenfalls eine Strömung, die Mischungsprozesse antreibt. Diese Beobachtungen zeigen, dass eine realistische Einschätzung des Eisregimes in numerischen Modellen unbedingt notwendig ist, so dass ozeanische Prozesse realistisch simuliert werden können. Die neuen Erkenntnisse bilden hierfür eine wichtige Grundlage.

- TP 3: Isotopengeochemische Signaturen - Wassermassenbildung für den Arktischen Ozean
Akademie der Wissenschaften und der Literatur Mainz

Die Winter-Datensätze zeigen eine stark unterschiedliche Modifikation der Wassersäule durch die Polynja. Es zeigt sich, dass die Struktur der Wassermassen in der zentralen Laptev-See nicht primär von der Menge des gebildeten Meereises gesteuert werden, sondern durch die Flusswasserverteilung des jeweils vorangehenden Sommers bestimmt sind und zudem stark durch Advektionsraten beeinflusst werden.

Überraschenderweise spielt die Flusswasserverteilung eine entscheidende Rolle für die saisonale lokale Eisschmelze, obwohl der Rückgang und die Ausdehnung der sommerlichen Eisdecke von anderen Faktoren kontrolliert werden. Die Flusswasserverteilung hat einen wesentlichen Einfluss auf den Wärmegehalt des Oberflächenwassers in der Laptev-See. Aufgrund der Wärmeabsorption der im Flusswasser enthaltenen Bestandteile steigt der Wärmegehalt mit höheren Flusswasseranteilen. Gleichzeitig verhindert die Trübe des Flusswassers das Eindringen der Sonneneinstrahlung in die tiefer liegenden Wasserschichten. Daher wird der weitere Anstieg des Wärmegehalts durch längere Sonneneinstrahlung wiederum durch das Flusswasser begrenzt. So können Jahre mit niedrigen Flusswasseranteilen und langer Sonnen-

einstrahlungsdauer relativ hohe Wärmegehalte aufweisen, während in Jahren mit hohem Flusswassergehalt eine lange Sonneneinstrahlungsdauer keine verstärkte Auswirkung auf den Wärmegehalt des Oberflächenwassers hat.

Der gesamte Süßwassergehalt in der Laptev-See variiert zwischen den Jahren, da die starken zwischenjährlichen Schwankungen des Flusswassereintrags, welche nur in Jahren mit hohem Flusswasseranteil auftreten, jeweils durch die Eisschmelze verstärkt werden. Trotz starker zwischenjährlicher Variabilität des Gesamt-Süßwasserbudgets bleibt das Budget der Meereisbildung von Jahr zu Jahr jedoch weitgehend konstant.

- TP 4: Änderungen von systemsteuernden Prozessen und Abläufen

Die Arbeiten im Teilprojekt hatten zum Ziel, die Polynja-Dynamik in der Laptev-See zu untersuchen und die damit in Verbindung stehende Eisproduktion zu bestimmen. Im Arbeitspaket Fernerkundung wurde eine Methodenverbesserung zur Bestimmung der Dünneisdicken auf der Basis von MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)-Eisoberflächentemperaturen erreicht. Unter Zuhilfenahme des Monte-Carlo-Verfahrens wurde der statistische Fehler in den Dünneisdicken für verschiedene Eisklassen quantifiziert und es wurde ein tägliches Komposit von Dünneisdicken für die Winter 2007/08 und 2008/09 erstellt. Diese werden zur Assimilation in das Meereis/Ozean-Modells FESOM (Finite Element Sea Ice Ocean Model) verwendet. Mittels der MODIS-Daten wurden Festeiskanten in monatlicher Auflösung berechnet. Es wurde ein Verfahren zur operationellen Ableitung von Eistrinnenkarten aus MODIS-Daten entwickelt. Für die Laptev-See zeigen die Untersuchungen, dass der Anteil der Eistrinnen an der Bildung von neuem Eis im Vergleich zu Polynjen ebenfalls einen wesentlichen Beitrag leistet.

Die Schwerpunkte der Modellierungen lagen auf der modellbasierten Abschätzung der Eisproduktion in den Laptev-See-Polynjen, der Untersuchung des Einflusses der Polynjen auf die atmosphärische Grenzschicht und der Assimilation von Fernerkundungsdaten in das Meereis/Ozean-Modell. Die im Projekt verfolgte Methodik zur Berechnung der Eisproduktion aus hochaufgelösten Simulationen mit dem COSMO (Consortium for Small Scale Modeling)-Modell wurde auf die Winter 2002/03 bis 2010/11 angewendet. Der Vergleich mit der Eisproduktionsabschätzung basierend auf Satellitendaten zeigt konsistente Ergebnisse und bestätigt, dass die Eisproduktion in den Polynjen deutlich geringer ist als bislang angenommen. Es wurde eine Methode der Assimilation von MODIS-Dünneisdicken in COSMO/FESOM entwickelt. Auf diese Weise wurde ein 3-stündlicher Dünneisdickendatensatz mit einer hori-

zontalen Auflösung von 5 km für die Winter 2007/08 und 2008/09 erstellt.

Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Projektbeginn

Im Verbundvorhaben „System Laptev-See – Eurasische Schelfmeere im Umbruch: Ozeanische Fronten und Polynjasysteme in der Laptev-See“ (FKZ 03G0639) wurden von 2007 bis 2009 umfangreiche interdisziplinäre Feldstudien in der Laptev-See durchgeführt, um erste Auswirkungen des globalen Klimawandels auf die Fronten- und Polynjasysteme zu erfassen und die Folgen für die Klimaentwicklung abzuschätzen. Meeresbodenobservatorien zeichneten im Gebiet der Laptev-See-Polynja und am Kontinentalhang der Laptev-See durchgehend Temperatur, Salzgehalt, Strömung und Trübe in der Wassersäule auf. Drei Sommer- und zwei Winterexpeditionen wurden durchgeführt.

In der Projektlaufzeit ist es gelungen, zwei verschiedene Wintersituationen zu erfassen. Im Jahr 2008 war die Laptev-See-Polynja sehr gut entwickelt und aktiv (Abb. 3), es gab eine kaum ausgeprägte Schichtung der Wassersäule mit auffallend warmem, salzreichem Bodenwasser. Dagegen zeigte die Polynja im Jahr 2009 eine sehr geringe Aktivität (Abb. 3), die Wassersäule war deutlich geschichtet, wobei das Oberflächenwasser sich durch extrem geringe Salinitätswerte auszeichnete. Warmes Bodenwasser fehlte.

Erste Auswirkungen des Klimawandels auf die Polynjasysteme wurden erfasst, und erstmals wurden mit Modellen realitätsnahe Simulationen zur Öffnung und Schließung von Polynjen und zur Eisdrift durchgeführt. Probleme traten jedoch aufgrund der oben aufgeführten Veränderungen des Umweltsystems mit zwei unterschiedlichen Wintersituationen bei der wissenschaftlichen Interpretation der Daten im Hinblick auf Eisproduktion, Wassermassenbildung, Stofftransport und Ozeanzirkulation auf. So ergab die Abschätzung der Meereisproduktion in der Laptev-See über Satellitendaten geringere Werte als durch Rechnungen mit dem Atmosphären/Eis/Ozean-Modell (COSMO-FESOM), wohingegen die ozeanographische Arbeitsgruppe einen noch zehnmal höheren Wert berechnete. Auch die Bedeutung der Laptev-See-Polynja für die Meereisbilanz der Arktis war unklar. Laut Modellrechnungen wurden in der Laptev-See im April 2008 nur ca. 15% des Meereises in der Polynja produziert, während anhand der klimatologischen Daten der Anteil der Eisbildung in der Polynja auf 30-50% geschätzt wurde.

In der Laptev-See fehlten darüber hinaus aktuelle Studien zur Verbreitung und Mächtigkeit des Festeises im Jahresverlauf und zu seiner Stabilität. Auch war in keinem der Modelle berücksichtigt worden, wie groß der Anteil des Festeises am Volumen des in den Arktischen

Ozean exportierten Eises ist und welche Bedeutung es für den Stofftransport hat. Festeis bedeckt in den Wintermonaten die gesamte südliche Laptev-See und begrenzt die Polynja nach Süden und Osten. Ca. 60% des jährlichen Flusswassereintrags sind im Festeis gebunden. Das Festeis in der sibirischen Arktis galt als stabiler Faktor im Umweltsystem. Studien zeigten jedoch, dass im Gebiet der Nordwestpassage die Destabilisierung des Landfesteises bereits zu einer erhöhten Mobilität des Eises geführt hatte und damit zu einem großen Problem für die Schifffahrt geworden war. Auch in der sibirischen Arktis gab es Anzeichen dafür, dass der Faktor Festeis an Stabilität verliert. So hatte in der Karasee der Einstrom von zunehmend warmem Zwischenwasser aus dem Atlantik bereits zu einer Abnahme der Mächtigkeit des Festeises geführt. Das Auftreten von küstennahen Polynjen im Bereich des Festeises östlich des Lena-Deltas bis in den Januar 2008 wurde als ein erstes Anzeichen für eine Destabilisierung in der Laptev-See vermutet.

Das Gesamtziel des Vorgängervorhabens war ohne eine hinreichende Interpretation der oben genannten strittigen Punkte nicht zufriedenstellend zu erreichen. Erforderlich für die Bewertung der Veränderungen war dabei auch die Berücksichtigung des Themenbereichs Stabilität des Festeises. Daher wurde eine Anschlusszuwendung für das Verbundvorhaben beantragt.

Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Innerhalb des Verbundvorhabens arbeiteten die deutschen Verbundpartner in der wissenschaftlichen Durchführung des Vorhabens sowie bei der Vorbereitung und Durchführung der Expeditionen äußerst eng und erfolgreich mit den russischen Partnern zusammen (s. Tab. 1). Hervorzuheben sind dabei die Hauptpartner von russischer Seite, das AARI und das Lena-Delta-Reservat, bei der Koordination des Verbundvorhabens und der Durchführung der Expeditionen und Arbeitstreffen sowie das russische Ministerium für Bildung und Wissenschaft bei der Erteilung der Forschungsgenehmigungen.

Tabelle 1: Wissenschaftliche Kooperation mit anderen Stellen (Fortsetzung nächste Seite)

Institution	Teilprojekt	Ansprechpartner	Themenbereich
Arctic and Antarctic Research Institute (AARI), Russland	TP 1A, 2, 4	L. Timokhov S. Kirillov	Physikalische Ozeanographie
	TP 2, 4	A. Maksthas	Meteorologie
	TP 1A, 2	A. Novikhin	Meereschemie
	TP 1A	I. Fedorova	Hydrologie
	TP 1A, 2	F. Matynov	Meeresbiologie
	TP 1A, 4	M. Kulakov	Ozeanographische Modellierung
	TP 1A	M. Makhotin	Ozeanographie, Meereschemie
Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI)	TP 1A	U. Schauer	Ozeanographie
	TP 1A	B. Heim	Fernerkundung
	TP 4	R. Gerdes R. Timmermann C. Lüpckes M. Nicolaus	Flugzeugmessungen, Meereismodellierung, Meereisfernerkundung
A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics der Russischen Akademie der Wissenschaften, Russland	TP 1A	I. Repina	Meteorologie
Bangor University, Großbritannien	TP 2	Y. Lenn	Turbulente Prozesse in der Wassersäule
British Antarctic Survey, Großbritannien	TP 1A	P. Abrahamsen	Ozeanographie
Deutscher Wetterdienst (DWD)	TP 4	D. Mironov U. Schättler	Atmosphärische Modellierung (COSMO)
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt	TP 2	T. Busche	Fernerkundung (TerraSAR-X)
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Schweiz	TP 2	L. Rabenstein	Fernerkundung, Eisdickenmessungen
Europäische Luft- und Raumfahrtbehörde	TP 2		Zugang zu Fernerkundungsdaten (ENVISAT)
Finnish Meteorological Institute (FMI)	TP 4	T. Vihma	Mesoskalige Modellierung in den Polargebieten
GEOTRACES – International Study of the Global Marine Biogeochemical Cycles of Trace Elements and Their Isotopes	TP 2	R. v. d. Loeff (AWI) M. Frank (GEOMAR)	Biochemische Kreisläufe in der Arktis
Helmholtz-Zentrum Geesthacht Zentrum für Material- und Küstenforschung GmbH	TP 4	B. Rockel	Gekoppelte mesoskalige Modellierung (COSMO-CLM)
International Arctic Research Center, USA	TP 1A	I. Polyakov	Ozeanographie
Leibniz-Labor für Altersbestimmung und Isotopenforschung in Kiel	TP 3	N. Andersen	Isotopengeochemie
Lena-Delta Reservat, Republik Sakha	TP 2	A. Gukhov	Meeresbiologie
	TP 1A, 2	K. Abramova	Meeresbiologie

Tabelle 2 (Fortsetzung): Wissenschaftliche Kooperation mit anderen Stellen

Institution	Teilprojekt	Ansprechpartner	Themenbereich
McGill University, Kanada	TP 1A	B. Tremblay	Ozeanographie
Moscow State University, Russland	TP 1A, 2	I. Kryukova, Ye. Polyakova E. Taldenkova Ya. Ovsepyan	Meeresbiologie Paläontologie Sedimentologie
Norwegischer Wetterdienst	TP 4	G. Noer O Saetra	Mesoskalige Prozesse in der Arktis
Oregon State University (CEOAS), USA	TP 3	J. McKay	Isotopengeochemie
P.P. Shirshov Institute of Oceanology der Russischen Akademie der Wissenschaften, Russland	TP 1A	E. Vinogradova	Meereschemie
St. Petersburg State University, Russland	TP 1A, 2, 3	Masterstudiengang	Isotopengeochemie Ozeanographie Meereismodellierung Meereisfernerkundung Fernerkundung Eisdickenmessungen Hydrologie Ozeanographische Modellierung Atmosphärische Mo- dellierung (COSMO)
University of Alberta, Kanada	TP 2, 4	Chr. Haas	Fernerkundung, Eisdickenmessungen
Universität Bremen	TP 4	G. Heygster	Meereisfernerkundung
University College London, Großbritannien	TP 4	D. Schröder	Meereismodellierung
Universität Hamburg	TP 4	L. Kaleschke	Meereisfernerkundung
University of Washington, USA	TP 1A	R. Woodgate	Ozeanographie

II. SCHLUSSBERICHT – EINGEHENDE DARSTELLUNG

TP 1A: Jahreszeitliche und räumliche Variabilität von ozeanographischen Fronten und Transportprozessen

Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse

Die Dynamik der Transportprozesse von Wärme, Salz, Schweb- und Nährstoffen scheint sich auf dem Laptev-See-Schelf seit dem Rekordsommer 2007 so verändert zu haben, dass es zu einem erhöhten Aufströmen von Schelfwassermassen vom Kontinentalrand auf den Schelf und zu einem erhöhten Transport von Süßwasser und Schwebstoffen in die Ostsibirische See kommt. Die Auswirkungen der veränderten Randbedingungen seit 2007 auf die Meereisproduktion, den Wärmetransport und auf die Sedimentbilanz des Laptev-See-Schelfs standen im Mittelpunkt des Teilprojektes. Um diese Auswirkungen zu untersuchen, wurden direkte, hydrologische Beobachtungen und ein modellierender Ansatz miteinander verbunden. Dazu wurden Meeresbodenobservatorien ausgebracht, die Strömung, Salz-, Temperatur- und Schwebstoffverteilung in der Wassersäule für den Verlauf eines Jahres aufzeichneten. Diese Daten wurden in der Zusammenschau mit detaillierten hydrologischen Messungen (Temperatur, Salzgehalt, Schwebstoff- und Chlorophyll-a-Konzentration, Nährstoffe) während zwei Sommer- und einer Winterexpedition mit dem historischen Datensatz des AARI (seit 1932) ausgewertet.

Ausbreitung der durch Atlantisches Zwischenwasser beeinflussten Wassermassen (Outer Shelf Waters, OSW)

Der mögliche Einstrom des OSW auf den Laptev-See-Schelf wurde durch die im Verbundvorhaben durchgeführten Wintermessungen untersucht und in Zusammenschau mit dem historischen Datensatz der russischen Partner vom AARI ausgewertet. Langzeitdatensätze der Jahre 1932 bis 2008 über die Temperatur- und Salzgehaltsverteilung auf dem Laptev-See-Schelf geben Hinweise auf eine Erwärmung des bodennahen Wasserkörpers, die sich vom äußeren Schelfbereich bis auf den mittleren Schelf ausbreiten kann (Dmitrenko et al., 2010a). Vergleiche dieser historischen Datensätze mit Langzeitaufzeichnungen von Wassertemperaturen im Atlantischen Zwischenwasser (AZW) zeigen eine deutliche Verbindung der Wassermassendynamik auf dem äußeren Laptev-See-Schelf mit der Dynamik innerhalb des „Atlantic Water Boundary Current“, der das vergleichsweise warme und salzhaltige AZW von der

Framstraße entlang des sibirischen Kontinentalhangs transportiert. Von Mitte der 90er Jahre bis Mitte 2000 wurde eine Erwärmung des AZW beobachtet, die sich in der Variabilität der Bodenwassertemperaturen des OSW widerspiegelt. Die im Winter 2008 erhobenen Datensätze zeigen zahlreiche Hinweise auf den windgetriebenen Einstrom von wärmerem und salzhaltigerem Wasser in Bodennähe. Diese Wasserkörper konnten teilweise sogar bis hin auf den inneren Schelf in Wassertiefen von nur 20 m nachgewiesen werden. Im Allgemeinen waren diese Wasserkörper $\sim 0,2^{\circ}\text{C}$ wärmer und hatten einen höheren Salzgehalt von $\sim 1-1,5$ psu als das umliegende Wasser (Dmitrenko et al., 2010a).

Unter der Annahme, dass die einzige Wärmequelle für das OSW auf dem östlichen Laptev-See-Schelf das AZW ist, führt der laterale Transport des Wassers aus der unteren Halokline (LHW: Low Halocline Water), das in seinen hydrologischen Eigenschaften aufgrund des aufwärts gerichteten Wärmetransport aus dem AZW verändert wurde, dann auf dem Schelf zu Veränderungen der Temperatur und des Salzgehalts im Bodenwasser. Dies spiegelt sich in einer Reihe von ozeanographischen Profilen aus den Jahren 2002-2009 vom äußeren Schelfbereich über den Kontinentalhang der Laptev-See hinweg in den tiefen Arktischen Ozean wider. Entlang dieser Profile stimmen die Unterschiede in Temperatur und Salzgehalt im LHW überein. Dabei war das LHW direkt im Bereich über dem Kontinentalhang jeweils durchschnittlich $0,39^{\circ}\text{C}$ wärmer und der Salzgehalt $0,26$ psu höher im Vergleich zum kontinentalhangfernen LHW (Dmitrenko et al., 2011). Die historischen Datensätze der russischen Partner vom AARI aus den Jahren 1940-2010 zeigen ebenfalls einen deutlichen Unterschied der Temperatur und des Salzgehalts innerhalb des LHW entlang von Profilen vom äußeren Schelfbereich über den Kontinentalhang der Laptev-See hinweg: Das LHW im Bereich direkt oberhalb des Kontinentalhangs war durchschnittlich $0,2^{\circ}\text{C}$ wärmer und der Salzgehalt $0,5$ psu höher im Vergleich zum kontinentalhangfernen LHW (Dmitrenko et al., 2012a; Abb. 1). Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass ein Großteil der Wärme und des Salzes aus dem AZW in das LHW im Bereich des Kontinentalhangs abgegeben wird. Dies setzt eine verstärkte vertikale Durchmischung über dem Kontinentalhang selbst voraus, die dort zu den Unterschieden im LHW beitragen würde. Es wird angenommen, dass die Variabilitäten in der Wassertemperatur des LHW mit dem Wärmetransport innerhalb des „Atlantic Water Boundary Current“ verbunden sind (Abb. 1). Die steuernden Prozesse für die Variabilität im Salzgehalt sind bisher noch nicht geklärt und sollen mit Hilfe eines numerischen Ansatzes untersucht werden.

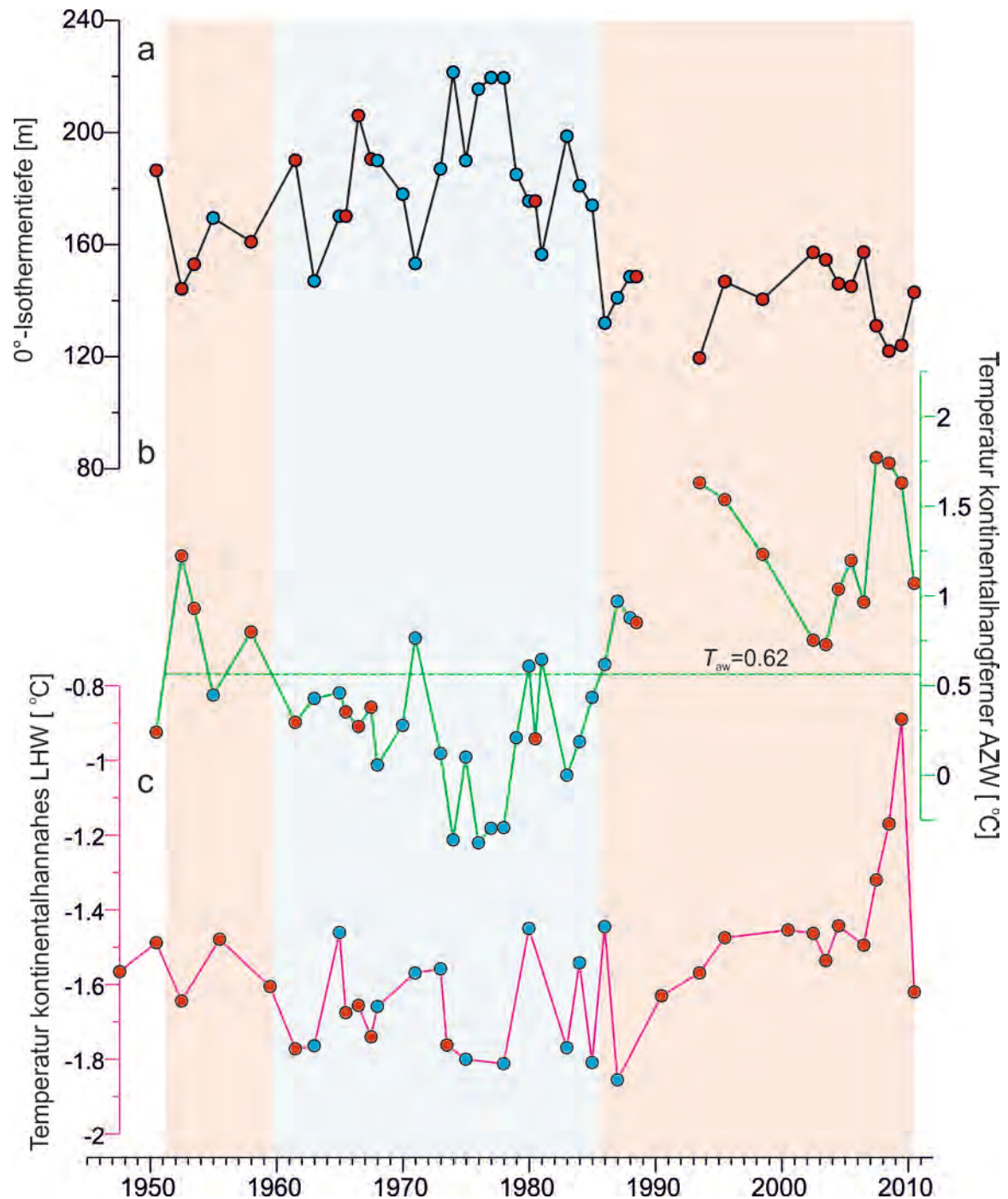


Abb. 1: Die Variabilität der 0°C-Isothermen-Tiefe innerhalb der oberen Lage des Atlantischen Zwischenwassers (AZW) (a; schwarze Linie) und der Wassertemperaturen innerhalb des kontinentalhangfernen AZW (b; grüne Linie) und innerhalb der kontinentalhangnahen unteren Halokline (LHW: Low Halocline Water) (c; rosa Linie) entlang von ~126°E aus den 1940er Jahren bis 2010. Die roten und blauen Punkte markieren die jeweiligen Sommer- bzw. Wintermessungen. Die rosa und blauen Schattierungen entsprechen Zeiten positiver und negativer Temperaturabweichungen für das kontinentalhangferne AZW (nach Dmitrenko et al., 2011).

Berechnung der Meereisproduktion mit Hilfe ozeanographischer Parameter

Die Meereisproduktion in der Polynja kann u. a. mit Hilfe des Unterschieds in den Sommer-

und Wintersalzgehalten ermittelt werden (Dmitrenko et al., 2009). Das episodische Einstürmen von OSW auf den mittleren Laptev-See-Schelf kann die Abschätzung der Meereisproduktion mit Hilfe der Salzgehaltsbeobachtungen maßgeblich verfälschen. Auswertungen der Strömungsmessungen mit der ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) in der gesamten Wassersäule und CTD-Messungen (Conductivity Temperature Depth Meter) haben entlang der Festeiskante auf dem östlichen Laptev-See-Schelf während der helikoptergestützten Expeditionen TRANSDRIFT XIII (April-Mai 2008) und TRANSDRIFT XIV (April 2009) eine verstärkte halbtägige Strömungsscherung im „Shelf Halocline Layer“ (SHL) gezeigt. Der SHL ist der Tiefenbereich zwischen dem relativ salzarmen, durchmischten Oberflächenwasser und der Wasserschicht mit höherem Salzgehalt darunter, der die vertikale Durchmischung der gesamten Wassersäule verhindert. 2008 wurde ein Maximum in der Amplitude der Gezeitenellipse des Gezeitenkomponenten M2 innerhalb der SHL in einer Wassertiefe von 11-13 m ($15 \pm 3 \text{ cm s}^{-1}$) gemessen. Im Oberflächenwasser unter dem Festeis in einer Wassertiefe von 7 m betrug die Amplitude dagegen nur $\sim 9 \pm 3 \text{ cm s}^{-1}$ und in 19 m Tiefe nur $7 \pm 2 \text{ cm s}^{-1}$. Die Daten im darauffolgenden Jahr 2009 weisen ein ähnliches Muster auf. Die Geschwindigkeiten sind allerdings um den Faktor 2 geringer. Zusätzlich zeigt eine Abschätzung der Richardson-Zahl für die Winterdaten 2008, dass diese Strömungsscherung zusammen mit dem halbtägigen baroklinen Gezeitenstrom ausreicht, um die zeitweise aufgezeichnete Turbulenz und vertikale Durchmischung innerhalb der SHL hervorzurufen (Abb. 2). Voraussichtlich trägt allein der oben beschriebene Prozess zusammen mit der Meereisbildung in der Polynja im Winter zum Anstieg des Salzgehaltes im Oberflächenwasser bei. Er überdeckt dabei das Signal des Salzflusses während der Meereisbildung, der bei der Abschätzung der Meereisproduktion mit Hilfe des Unterschieds in den Sommer- und Wintersalzgehalten bisher zu deutlich erhöhten Werten im Vergleich mit Berechnungen aus Satellitendaten oder mit dem Atmosphären-/Eis/Ozean-Modell (COSMO-FESOM; Schröder et al., 2011) geführt hat.

Veränderter Stofftransport und seine Auswirkungen auf das Sedimentbudget

Um die Auswirkungen der veränderten Randbedingungen auf den Stofftransport zu untersuchen, wurden die während der Schiffsexpeditionen TRANSDRIFT XII (September 2007), XIV (September 2008), XVI (September 2009) und XVII (September 2010) durchgeführten detaillierten ozeanographischen (Temperatur, Salzgehalt, Strömungsparameter), optischen (Trübe), hydrochemischen (Schweb- und Nährstoffe, stabile Sauerstoffisotopen) und biologischen (Chlorophyll-*a*-Konzentration) Prozessstudien analysiert und in Zusammenarbeit mit

den Teilprojekten 2 und 3 und den russischen Partnern ausgewertet.

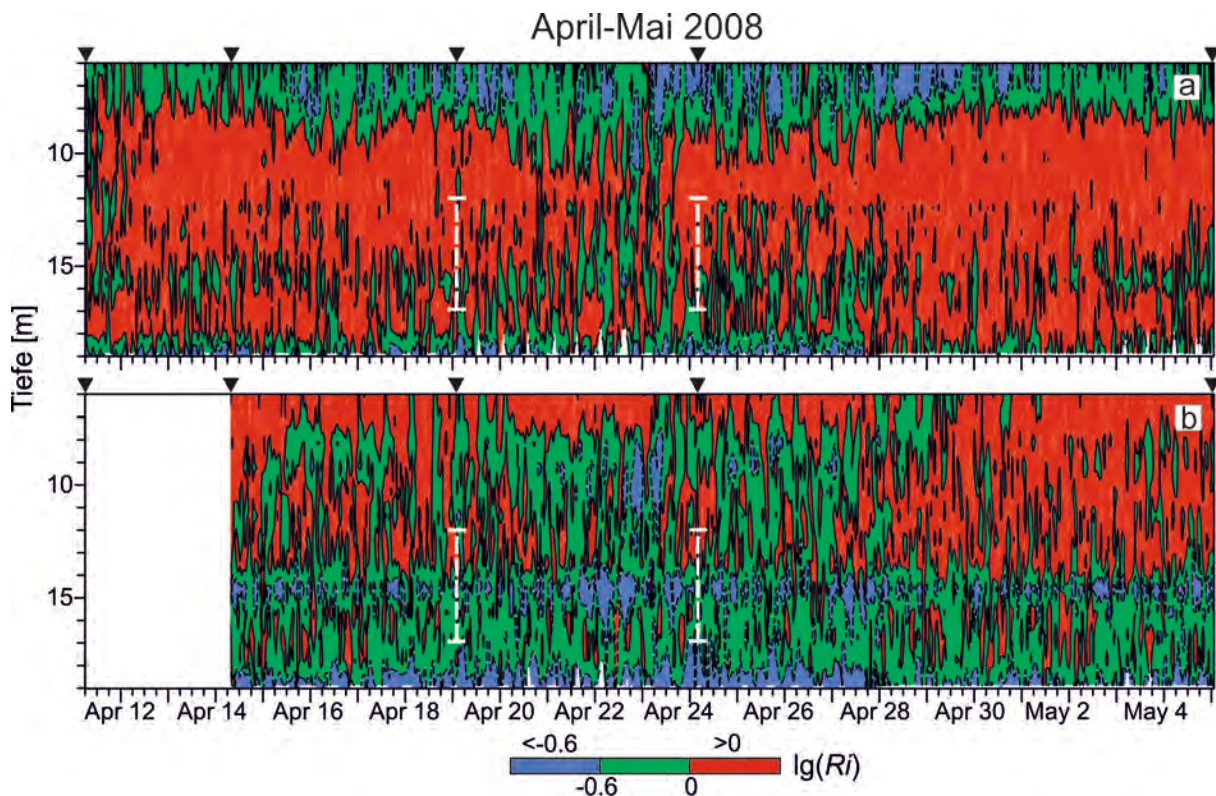


Abb. 2: Eine logarithmische Darstellung der Richardson-Zahl Ri für die Kurzzeitmooring während der helikoptergestützten Expedition TRANSDRIFT XIII. Dabei wurde Ri für das erste (a) und zweite (b) CTD-Profil an der Position der Kurzzeitmooring am 11. und 14. April 2008 berechnet. Eine Strömungsscherung bei $Ri < 0$ ist ausreichend, um Turbulenz und Durchmischung hervorzurufen. Die schwarzen Dreiecke markieren jeweils den Zeitpunkt von zusätzlichen CTD-Profilen (nach Dmitrenko et al., 2012b).

Die Auswertungen deuten auf einen eindeutigen Zusammenhang zwischen der sommerlichen Verteilung des Süßwassers der Lena und der Transportdynamik von Schweb- und Nährstoffen in der gesamten Wassersäule hin (Wegner et al., 2013). Im Sommer bilden sich durch den hohen sommerlichen Flusseintrag klare Frontensysteme zwischen dem Süßwasser der Lena und dem Schelfwasser der Laptev-See aus. Die Verteilung des Süßwassers der Lena auf dem Laptev-See-Schelf – und damit auch die Lage der Frontensysteme – ist eng mit der vorherrschenden atmosphärischen Zirkulation im Eurasischen Becken verbunden. Während Sommern mit einer vorwiegend zyklonischen atmosphärischen Zirkulation im Eurasischen Becken und daraus resultierenden vorherrschenden küstenparallelen Winden auf dem Laptev-See-Schelf (z. B. 2007, 2009) wird das Süßwasser nach Osten transportiert (Dmitrenko et al., 2008). Die oberflächennahe Schwebstoffkonzentration auf dem östlichen inneren Schelf war in diesen Jahren erhöht (Wegner et al., 2013; Abb. 3). Auf dem mittleren und äußeren Schelf war die oberflächennahe Schwebstoffkonzentration dagegen vergleichsweise gering. Aufgrund einer schwächeren Schichtung der Wassersäule in diesem Bereich des Schelfs konnte

innerhalb der bodennahen Nepheloidlage, einer Lage mit erhöhter Schwebstoffkonzentration, ein deutlicher Anstieg sowohl im Schwebstofftransport als auch in der -konzentration beobachtet werden (Wegner et al., 2013; Abb. 4). Gleichzeitig erhöhte sich die bodennahe Silikatkonzentration und der Anteil von gelöstem Sauerstoff nahm ab (Wegner et al., 2013; Abb. 3).

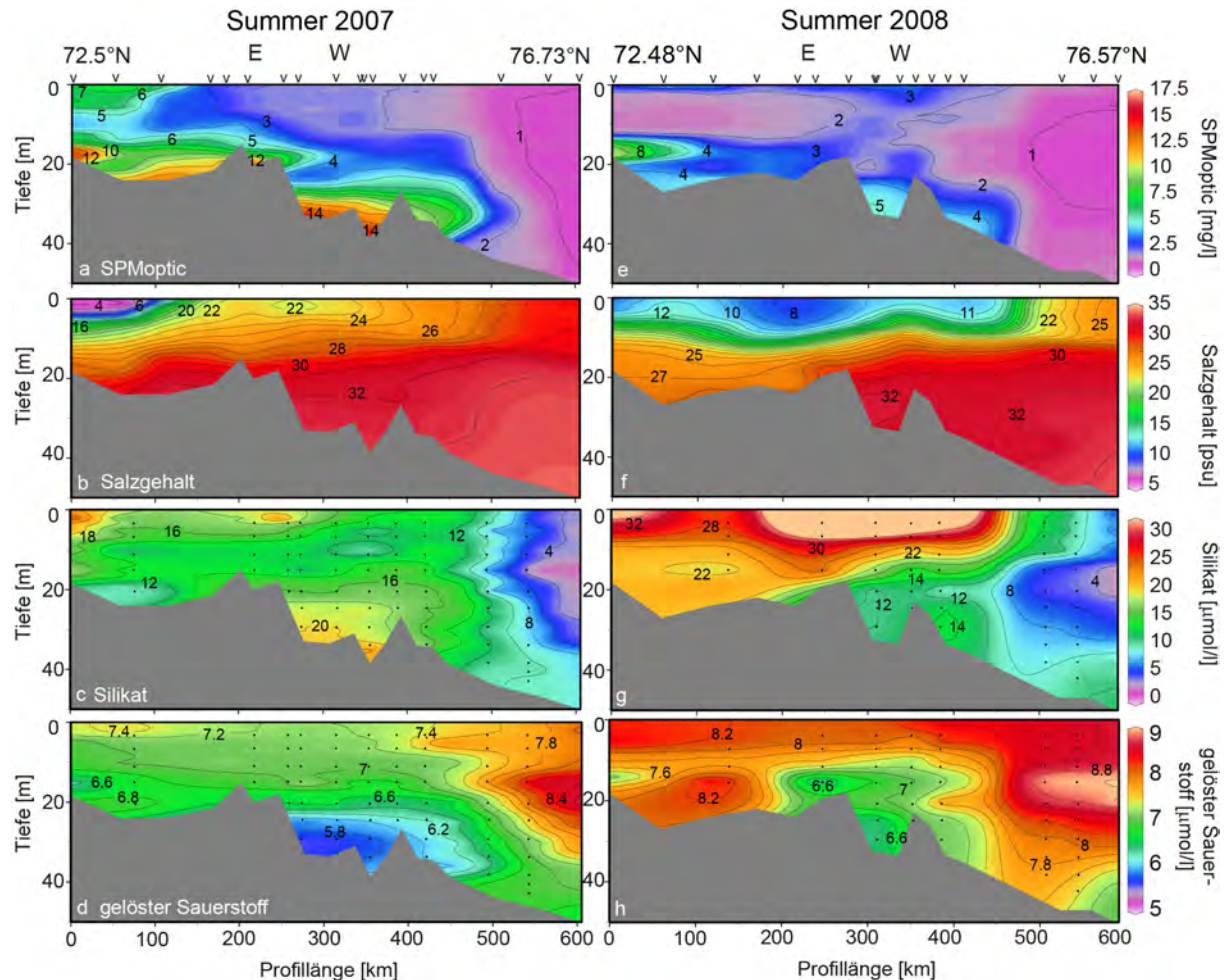


Abb. 3: Die Schwebstoffkonzentration (a, e; [mg/l]), Salzgehalt (b, f; [psu]), Silikatkonzentration (c, g; [$\mu\text{mol/l}$]) und gelöster Sauerstoff (d, h; [$\mu\text{mol/l}$]) entlang eines Süd-Nord-Profiles über den östlichen Laptev-See-Schelf während der Schiffsexpeditionen TRANSDRIFT XII (Sommer 2007) und XIV (Sommer 2008; nach Wegner et al., 2013).

Während Sommern mit einer vorwiegend antizyklischen atmosphärischen Zirkulation im Eurasischen Becken und daraus resultierenden vorherrschenden ablandigen Winden auf den Laptev-See-Schelf wird das Süßwasser der Lena nach Norden in den mittleren Schelfbereich transportiert (Dmitrenko et al., 2008). Während dieser Jahre (2008, 2010) war der oberflächennahe Transport der Schwebstoffe verstärkt, was zu erhöhten Schwebstoffkonzentration bis 76°N auf den Laptev-See-Schelf führte. Gleichzeitig führte der verstärkte Transport des Süßwassers nach Norden zu einer Verschiebung des Frontensystems und zu einer erhöhten Schichtung in der Wassersäule. Diese Schichtung verhinderte eine starke Durch-

mischung und hatte einen geringeren bodennahen Transport der Schwebstoffe zur Folge (Wegner et al., 2013; Abb. 4).

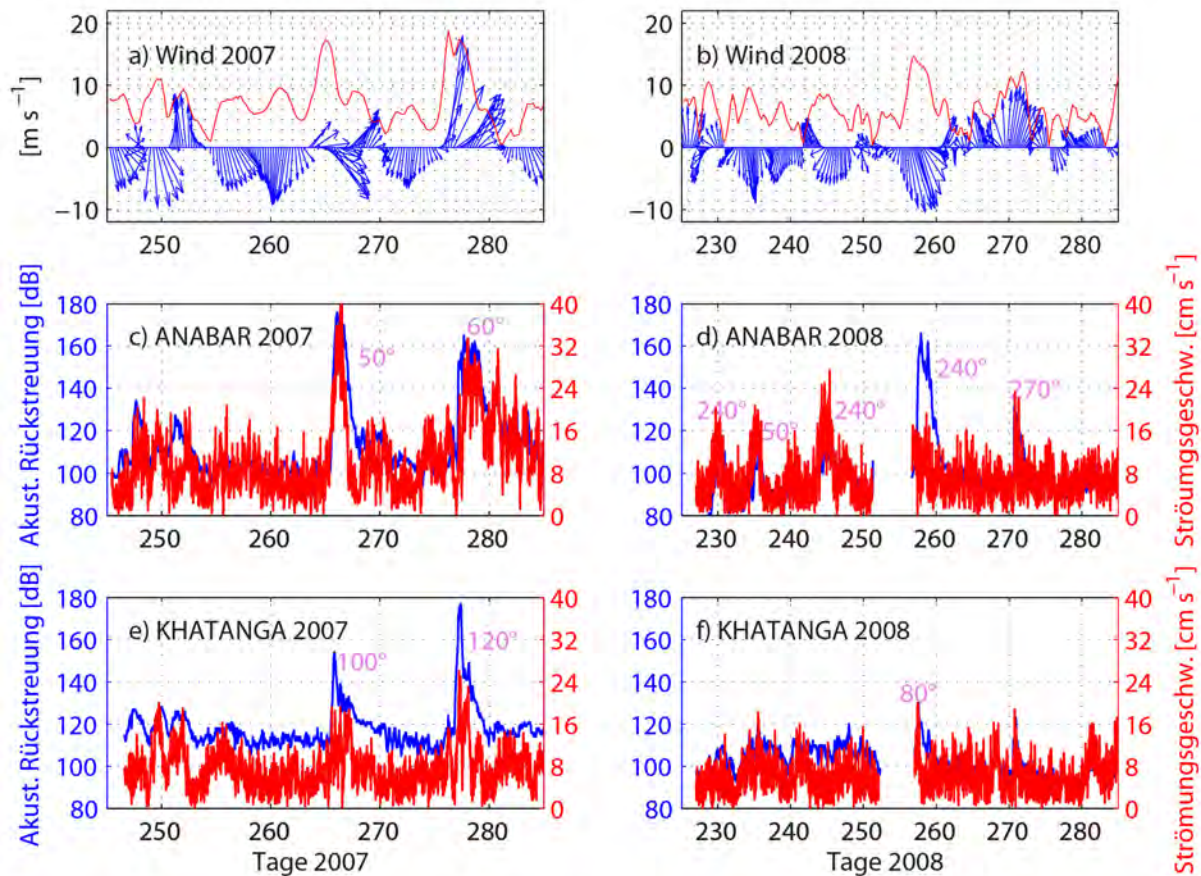


Abb. 4: Ein-Tages-Mittel der Windgeschwindigkeit [m/s] und -richtung (a, b), Strömungsgeschwindigkeit [cm/s] und akustische Rückstreuung [dB] für August-September 2007 und 2008 an den Langzeitobservatorien ANABAR (c, d) und KHATANGA (e, f). Die Strömungsrichtung wurde jeweils für die Maxima in akustischer Rückstreuung angegeben, wenn angenommen werden kann, dass verstärkter Sedimenttransport stattgefunden hat. Die „NCEP (National Centers for Environmental Prediction) Reanalysis“-Winddaten wurden durch National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)/Office of Oceanic and Atmospheric Research/Earth System Research Laboratory Physical Sciences Division, Boulder, Colorado, USA (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/>), zur Verfügung gestellt (nach Wegner et al., 2013).

Seit zwanzig Jahren werden im September ein deutlich positiver Trend in der Größe von Tiefdruckgebieten über dem Eurasischen Becken und ein gehäuftes Vorkommen dieser Tiefdruckgebiete in der östlichen Arktis beobachtet (Simmonds & Keay, 2009). Diese Tiefdruckgebiete führen auf dem Laptev-See-Schelf zu vorherrschend küstenparallelen Winden und einem damit verbundenen Transport des Süßwassers der Lena nach Osten wie 2007 und 2009. Wie unsere Studien zeigen, führen diese atmosphärischen Bedingungen zu einem deutlichen Anstieg in der oberflächennahen Schwebstoffkonzentration auf dem inneren Schelf. Gleichzeitig findet erhöhter bodennaher Schwebstofftransport statt und der Anteil von gelöstem Sauerstoff sinkt auf dem mittleren Schelf. Dies hat nicht nur Auswirkungen auf das Sedimentbudget, sondern kann Auswirkungen auf das sensible arktische Ökosystem durch

Veränderungen des Nährstoffgehalts und der Lichtverhältnisse in der Wassersäule haben.

Die ersten Auswertungen der Langzeitbeobachtungen aus den Jahren 2009-2010 vom zentralen Bereich des Laptev-See-Schelfs an den Meeresbodenobservatorien ANABAR und KHATANGA zeigen selbst während der Zeit der Eisbedeckung einen stetigen Anstieg in der Trübe, die als Indikator für Schwebstoffkonzentration genutzt werden kann (Abb. 5). Dieser stetige, für die Monate der Eisbedeckung sehr ungewöhnliche Anstieg in den Trübedaten entspricht eher dem Verlauf während der eisfreien Monate, während derer die Konzentration innerhalb der trüben Bodenlage durch lateralen Transport, Absinken von flusstransportiertem Material und Resuspension von Bodenmaterial erhöht wird. Es gibt Hinweise, dass der Anstieg unter dem Meereis einher geht mit dem Transport von Wasser aus der nord-westlichen Laptev-See. Dieser Anstieg in der Trübe hat insbesondere für die biogeochemischen Stoffkreisläufe und die Primärproduktion im Spätwinter große Bedeutung. Für ein vollständiges Verständnis dieser Daten fehlen jedoch kombinierte Strömungs- und Schwebstoffmessungen im westlichen Schelfbereich.

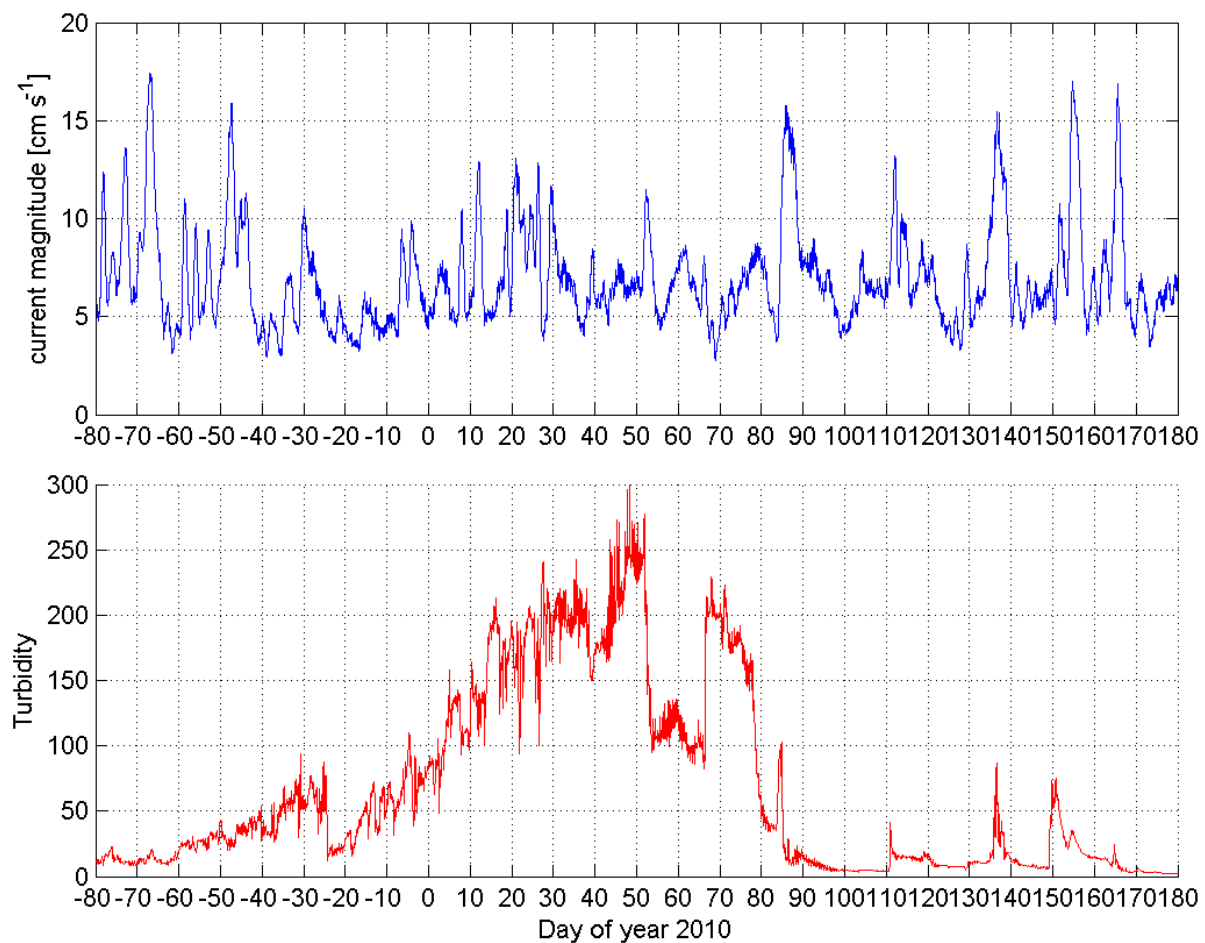


Abb. 5: Strömungsgeschwindigkeit in Bodennähe (a) und Trübe (b) am Langzeitobservatorium KHATANGA während des Winters 2009/2010.

Numerische Modellierung der Transportprozesse

Zur Abschätzung der Auswirkung von jahreszeitlichen Verschiebungen insbesondere auf den Transport von Wärme, Salz und Schwebstoffen sind modellierende Ansätze unabdingbar. Für die Simulation der Transportprozesse für einen gesamten Jahresgang wurde das hydrodynamische Transportmodell des AARI, das hinsichtlich der Strömungen unter eisfreien Bedingungen schon während des Vorgängerprojektes von einer russischen Forschergruppe verbessert und verifiziert wurde, verwendet. Um Transportprozesse auch während der Zeit der Eisbedeckung zu modellieren, wurde ein gekoppeltes thermodynamisches Meereis/Ozean-Modell in Zusammenarbeit mit der russischen Forschergruppe und TP 4 auf der Grundlage des bestehenden AARI-Ozeanmodells und des Meereismodells nach Makshtas et al. (2003) entwickelt. Dieses Modell ist in der Lage, die Strömungen, Meereiszirkulation und die Verteilung von Meereis in der Laptev-See zu reproduzieren. Es bildet somit die Grundlage dafür, erstmalig die Sedimentdynamik während der Zeit der Eisbedeckung zu modellieren.

Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Erfassung von ozeanographischen und hydrologischen Umweltparametern ist eine grundlegende Voraussetzung für das Verständnis von Klimaveränderungen und deren Prognose. Die im beantragten Verbundvorhaben erfassten Parameter liefern wichtige Basisdaten, die in bestehende Klimamodelle eingebaut werden und damit deren Prognosefähigkeit verbessern. Zusätzlich schafft das Transportmodell die wissenschaftliche Grundlage für die Entwicklung von Entscheidungshilfen im Schelfmanagement und der damit verbundenen Durchführung von Rohstoffgewinnung.

Die Verwertbarkeit der erhobenen Daten liegt zwar hauptsächlich im Bereich der Grundlagenforschung, jedoch bilden die erfassten ozeanographischen und hydrologischen Umweltparameter und die Studien über die Dynamik der Transportprozesse von Wärme, Salz, Schwebstoffen und Nährstoffen eine wichtige Grundlage zum besseren Verständnis und zur verbesserten Vorhersagbarkeit der Auswirkungen des Klimawandels in der Arktis auf die Meereisproduktion und den Wärme- und Sedimenttransport auf dem Laptev-See-Schelf. Kommt es z. B. zu einem veränderten Wärmetransport im Bodenwasser auf dem Laptev-See-Schelf, kann dies zu Auftauprozessen im submarinen Permafrost des Laptev-See-Schelfs führen (s. Anhang H: Presseberichte, Fernseh- und Hörfunkbeiträge). Dies wiederum hat eine Freisetzung des Treibhausgases Methan zu Folge, von dem angenommen wird, dass es zurzeit in erheblichen Mengen im stabilen Zustand im submarinen Permafrost auftritt und bei

Freisetzung schwerwiegende Auswirkungen auf Klima-veränderungen haben wird.

Die erzielten Ergebnisse werden in internationalen Fachzeitschriften publiziert und auf internationalen Fachtagungen präsentiert. Die ozeanographischen Datensätze und die Schwebstoffdaten werden von deutscher Seite in die Datenbank PANGAEA und von russischer Seite in die nationale Datenbank „Nationale Ozeanographische Datenbank der Russischen Föderation“ eingespeist. Die Daten aus PANGAEA werden an die internationale Datenbank „Word Data Center System (WDC)“ weitergeleitet und stehen damit der internationalen wissenschaftlichen Gemeinde zur Verfügung.

Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Es sind keine relevanten Ergebnisse auf dem Gebiet bei anderen Stellen bekannt geworden.

TP 1B: KoordinationEingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse

Das Koordinationsteam führte das am Leibniz-Institut für Meereswissenschaften (IFM-GEOMAR) angesiedelte Sekretariat „System Laptev-See“ als die zentrale Anlaufstelle des Verbundvorhabens weiter. Ihm oblag die Aufgabe, eine optimale Kommunikation innerhalb des Verbundvorhabens und mit den russischen Partnern bzw. den zuständigen Behörden in Deutschland und Russland, insbesondere der Republik Sacha, zu gewährleisten. Besondere Bedeutung kam dabei der Zusammenarbeit mit dem OSL und den OSL-Stipendiaten sowie den russischen Forschergruppen zu. Das Sekretariat bündelte die vielfältigen Koordinationsaufgaben und sicherte länderübergreifend die thematische Vernetzung des Verbundvorhabens.

- Vorbereitung und Durchführung der Expeditionen

Im Berichtszeitraum wurden in enger Abstimmung mit dem AARI, dem Föderalen Staatlichen Hydrographischen Einheitsunternehmen, dem Lena-Delta-Reservat und dem russischen Ministerium für Bildung und Wissenschaft zwei Sommer- und eine Winterexpedition organisiert und erfolgreich durchgeführt. Ein kurzer Überblick folgt.

Im Jahr 2010 wurde die Sommerexpedition TRANSDRIFT XVII mit dem russischen Forschungsschiff „Nikolay Evgenov“ (31.8.-9.10.2010) durchgeführt (s. Abb. 4 in Kapitel I). An der Expedition nahmen elf Wissenschaftler des AARI, des AWI, des IFM-GEOMAR, des Lena-Delta-Reservats und der Akademie der Wissenschaften und der Literatur Mainz und acht Studierende des Masterstudiengangs POMOR im Rahmen ihres Feldpraktikums teil. Während der Expedition wurden zwei Meeresobservatorien geborgen (ANABAR09, KHATANGA09), die im Jahr 2009 während der Expedition TRANSDRIFT XVI ausgesetzt worden waren. Sie wurden nach Wartung und Reparatur für ein weiteres Jahr an denselben Positionen erneut ausgebracht. Außerdem wurden drei neue Meeresobservatorien ebenfalls für die Dauer eines Jahres ausgesetzt (OSL2E, OSL4, KOTELNYY). Nicht wie geplant geborgen werden konnte das Meeresobservatorium OSL2D. Ein besonderer Höhepunkt der Expedition war dagegen die Bergung des Meeresobservatoriums ST. ANNA. Dieses war im Jahr 2009 vom AARI während der Expedition Arctica-Kara-2009 im Sankt-Anna-Trog in der Karasee in 520 m Tiefe ausgesetzt worden und hat einzigartige Daten über die Struktur und Verbreitung von atlantischem Zwischenwasser in diesem Gebiet, in dem vorher keinerlei

Messungen über den Zeitraum eines Jahres durchgeführt wurden, geliefert. Darüber hinaus wurden an insgesamt 51 Stationen in der Laptev-See ozeanographische Messungen durchgeführt sowie Proben für meereschemische, biologische und isotopengeochemische Untersuchungen genommen.

Die Sommerexpedition TRANSDRIFT XIX mit dem russischen Forschungsschiff YAKOV SMIRNITSKY (23.8.-9.9.2011) wurde 2011 vorbereitet und erfolgreich durchgeführt (s. Abb. 5 in Kapitel I). An der Expedition nahmen zwölf Wissenschaftler des AARI, des AWI, der Akademie der Wissenschaften und der Literatur Mainz, des Gesamt-russischen Gramberg-Instituts für Geologie und Natürliche Ressourcen des Weltozeans, des IFM-GEOMAR, des Lena-Delta-Reservats, der Staatlichen Universität Sankt Petersburg und der Universität Trier teil. Zwei Meeresobservatorien (KHATANGA10, OSL2E) wurden geborgen. Fünf Meeresobservatorien (ANABAR10, KOTELNYY, OSL2D, OSL3, OSL4) konnten u. a. aufgrund des Versagens des Auslösemechanismus nicht geborgen werden. Zwei Meeresobservatorien (KHATANGA11, OSL2F) wurden erfolgreich ausgesetzt. Das Observatorium OSL2F wurde im September 2012 mit FS POLARSTERN im Rahmen der Expedition ARK-XXVII/3 geborgen. Die Arbeitsgenehmigung für diesen Fahrtabschnitt wurde gemeinsam mit dem AARI und dem AWI beantragt. Bedingung für die Erteilung der Arbeitsgenehmigung war es, die Teilnahme eines russischen Wissenschaftlers zu ermöglichen, der für die Bergung und für die Daten verantwortlich war. Mit Ivan Ryzhov übernahm diese Aufgabe ein POMOR-Alumnus. Einen Überblick über die Positionen der Meeresobservatorien in der Laptev-See zeigt Abbildung 1. An 39 Stationen in der Laptev-See wurden darüber hinaus ozeanographische Messungen durchgeführt sowie Proben für meereschemische, biologische und isotopengeochemische Untersuchungen genommen. Erschwert und eingeschränkt wurden die Arbeitsbedingungen durch einen schweren Sturm.

Die Winterexpedition TRANSDRIFT XVIII konnte, wie in Kapitel I erläutert, 2011 nicht durchgeführt werden. Nach Antragstellung und Bewilligung einer kostenneutralen Verlängerung des Verbundvorhabens bis zum 31.12.2012 wurde die Expedition unter der Bezeichnung TRANSDRIFT XX vom 19.3. bis 24.4.2012 erfolgreich durchgeführt. Zwanzig Wissenschaftler vom AARI, AWI, GEOMAR, Lena-Delta-Reservat und von den Universitäten Moskau und Trier nahmen an der Expedition teil. Ziel waren die Untersuchung des Aufbaus und der Stabilität des Festeises und die Validierung der Satellitendaten in Bezug auf die Eisbilanz im Bereich des Festeises und im Übergangsbereich Festeis/Polynja. Östlich und nördlich des Lena-Deltas wurden auf dem Festeis drei vierwöchige Eiscamps eingerichtet, um meteorolo-

gische, ozeanographische, meereschemische, biologische und sedimentologische Messungen durchzuführen. Außerdem wurden Hubschraubermessflüge und ein umfangreiches eisphysikalisches Messprogramm durchgeführt, um die Stabilität und die Mächtigkeit des Meereises zu bestimmen. Zwei Kurzzeitobservatorien im nördlichen und im zentralen Eiscamp waren drei bzw. vier Wochen im ununterbrochenen Einsatz. Zusammenfassend konnten einschneidende Änderungen des Ökosystems beobachtet und im Vergleich zu den Winterexpeditionen TRANSDRIFT XIII und XV (2008 und 2009) eine deutliche Abnahme der Mächtigkeit des Meereises gemessen werden.

Meeresobservatorien

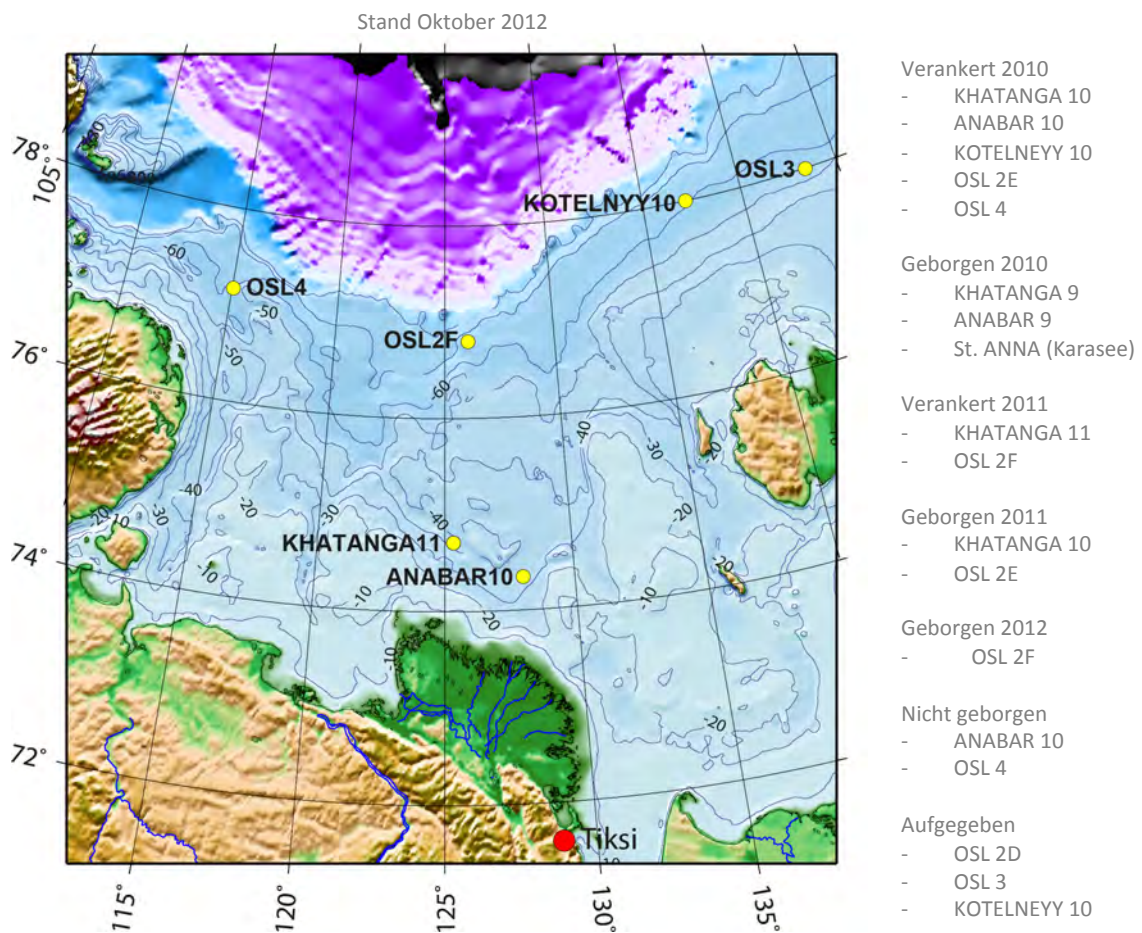


Abb. 1: Die Positionen der Meeresobservatorien in der Laptev-See.

Vom 16. bis 20. April 2012 besuchten der Ständige Vertreter des Botschafters der Bundesrepublik Deutschland, Dr. Georg Birgelen, seine Gattin und der Leiter des Referats für Wissenschaft und Bildung der Botschaft, Karsten Heinz, die Expedition, um sich vor Ort ein Bild über die bilaterale Kooperation im Bereich der Polar- und Meeresforschung zu machen.

Schon am ersten Tag nach der Ankunft in Tiksi wurden die Gäste in die Stationsarbeiten einbezogen und begleiteten die Expeditionsteilnehmer auf das Festeis nahe der Polynja.

- Meeresboden- und Kurzzeitobservatorien sowie Beschaffung der Großgeräte und Sicherstellung ihrer Einsatzfähigkeit

Die im Verbundvorhaben angeschafften Großgeräte für die TRANSDRIFT-Expeditionen wurden gewartet und für die Schiffseinsätze vorbereitet. Neu- und Ersatzbeschaffungen von Messinstrumenten für die Meeresbodenobservatorien ANABAR, KHATANGA und KOTEL-NYY sowie für die Kurzzeitobservatorien der Winterexpedition wurden zentral über das Sekretariat „System Laptev-See“ getätigt. Darüber hinaus wurde während der Expeditionen die Einsatzfähigkeit der Messinstrumente durch Reparaturen, Modifizierung, Kalibrierung etc. vor Ort sichergestellt.

Das Sekretariat stellte außerdem die temporäre Einfuhr der Expeditionsfracht in die Russische Föderation sicher. Die Tätigkeiten wurden durch eine neue Gesetzgebung in Russland erheblich erschwert und waren sehr aufwändig.

- Organisation der bilateralen Arbeitstreffen

Vom 13. bis 14. Juli 2010 wurde ein bilaterales Planungstreffen der Verbundpartner am OSL in Sankt Petersburg durchgeführt. Zweck des Treffens war neben der wissenschaftlichen Abstimmung des Verbundvorhabens in erster Linie die Vorbereitung der für 2011 geplanten Winterexpedition TRANSDRIFT XVIII.

Ein weiteres bilaterales Arbeitstreffen der Verbundpartner wurde am 5. Juli 2011 am OSL in Sankt Petersburg organisiert. Zweck des Treffens waren die wissenschaftliche Abstimmung des Arbeitsprogramms der Expedition TRANSDRIFT XIX (2011) sowie die gemeinsame Auswertung der bisherigen Ergebnisse.

Vom 17. bis 21. Dezember 2012 fand zur gemeinsamen Synthese der Ergebnisse das 10. Arbeitstreffen „Russisch-deutsche Zusammenarbeit: System Laptev-See“ mit fünfzig Teilnehmern aus Deutschland und Russland statt. Unter den Teilnehmern waren auch Ivan Vorobyev, der Verwaltungsdirektor des Lena-Delta-Reservats in Tiksi, und Uwe Döring, ehemaliger Minister für Justiz, Arbeit und Europa des Landes Schleswig-Holstein (Abb. 2).



Abb. 2: Die Teilnehmer des 10. Arbeitstreffens „Russisch-deutsche Zusammenarbeit: System Laptev-See“.

- Durchführung von Arbeitstreffen der deutschen Verbundpartner

Ein Arbeitstreffen der deutschen Verbundpartner wurde am 29. November 2010 am IFM-GEOMAR organisiert. Im Mittelpunkt dieses Treffens stand die logistische und wissenschaftliche Abstimmung der Expedition TRANSDRIFT XVIII. Für die Planung der verschobenen Expedition TRANSDRIFT XX (2012) wurde am 12. Dezember 2011 am IFM-GEOMAR ein weiteres Arbeitstreffen der deutschen Verbundpartner durchgeführt.

- Durchführung des 15. bis 17. bilateralen Arbeitstreffens

Gemeinsam mit dem OSL und dem Projektträger Jülich des BMBF wurden das 15., 16. und 17. bilaterale Arbeitstreffen im Rahmen der Fachvereinbarung über die Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Meeres- und Polarforschung zwischen dem Bundesministerium für Bildung und Forschung der Bundesrepublik Deutschland und dem Ministerium für Bildung und Wissenschaft der Russischen Föderation am IFM-GEOMAR in Kiel (2010), am AARI in Sankt Petersburg (2011) bzw. am Institut für Bodenkunde der Universität Hamburg (2012) organisiert.

- Betreuung von Gastwissenschaftlern

Im Jahr 2010 wurden vierzehn, 2011 elf und 2012 zehn Gastaufenthalte von russischen Wissenschaftlern am AWI, IFM-GEOMAR und an der Universität Trier organisiert (vgl. Anhang E). Die Gastwissenschaftler trugen durch ihre Forschungsaufenthalte wesentlich zur Vorbereitung der Expeditionen und Auswertung der Ergebnisse bei.

- Koordination und Betreuung der russischen Forschergruppen

In allen Teilprojekten wurden die Forschungsarbeiten durch russische Forschergruppen (vgl. Anhang F) erfolgreich ergänzt, die Untersuchungen zu den themenspezifischen Teilaufgaben des Verbundvorhabens durchgeführt haben: Meeresbiologie, Meeresgeologie, Meereschemie, Ozeanographie, Eisphysik und Modellierung. Eine Übersicht der Aufgaben zeigt Tabelle 1. Die Berichte der Forschergruppen über ihre Tätigkeiten finden sich im Anhang G.

Tab. 1: Übersicht der wissenschaftlichen Aufgaben der russischen Forschergruppen (Fortsetzung auf nächster Seite)

Themenfeld	TP	Aufgaben
Meeresbiologie	1	<ul style="list-style-type: none"> • Untersuchung der Planktonartenzusammensetzung im Hinblick auf die aktuellen Veränderungen des Ökosystems • Probennahme zur Bestimmung der Chlorophyllkonzentration für die TRANSDRIFT-Expeditionen und Analyse der Chlorophyllkonzentration hinsichtlich des organischen Anteils der Schwebstoffe • Probennahme zur Ermittlung der Planktonartenzusammensetzung für die TRANSDRIFT-Expeditionen und Analyse der Planktongemeinschaften hinsichtlich der Charakterisierung von Wassermassen
	2	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse der Chlorophyllgehalte und Bestimmung des „chromophoric dissolved organic carbon“ (CDOM) zur Untersuchung der Mischungsprozesse in der Wassersäule sowie zur Charakterisierung der saisonalen Prozesse in der Dichtesprungschicht
	3	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse der Meereisflora und -fauna zur Eingrenzung der Entstehungsgebiete des Meereises und Vergleich mit der $d^{18}O$-Signatur des Eises
Meereschemie	1	<ul style="list-style-type: none"> • Probennahme zur Nährstoffbestimmung und Bestimmung des Sauerstoffgehalts für die TRANSDRIFT-Expeditionen sowie Analyse der Nährstoff- und Sauerstoffproben zur Wassermassencharakterisierung und hinsichtlich der biologischen Produktivität
	2	<ul style="list-style-type: none"> • Durchführung von Nährstoffanalysen für die TRANSDRIFT-Expeditionen und Analyse der Verteilung von Nährstoffen und Spurenelementen im Meerwasser und Meereis zur Untersuchung von Mischungsprozessen in der Wassersäule und zur Charakterisierung saisonaler Prozesse in der Dichtesprungschicht
	3	<ul style="list-style-type: none"> • Durchführung von Nährstoffanalysen für die TRANSDRIFT-Expeditionen und Auswertung in Bezug auf Wassermassenidentifizierung

Tab. 1 (Fortsetzung): Übersicht der wissenschaftlichen Aufgaben der russischen Forschergruppen

Themenfeld	TP	Aufgaben
Eisphysik	2	<ul style="list-style-type: none"> Eisdicken- und Temperaturmessungen während der Winterexpedition TRANSDRIFT XVIII zur Analyse der Stabilität des Eises und zur Validierung der Fernerkundungsdaten Bestimmung der physikalischen Eigenschaften des Meereises während TRANSDRIFT XVIII als begleitende Untersuchungen zur Genese und Stabilität des Festeises in der Laptev-See
	3	<ul style="list-style-type: none"> Eisstrukturanalysen zur Eingrenzung der Genese von Meereisproben und Abgleich mit Ergebnissen der $d^{18}O$-Signatur des Eises
Meeresgeologie	1	<ul style="list-style-type: none"> Untersuchung der Zusammensetzung und Verteilung der Oberflächensedimente zur Implementierung in das hydrodynamische Transportmodell des AARI und zur Abschätzung des Sedimentbudgets in der Laptev-See
Ozeanographie	1	<ul style="list-style-type: none"> Auswertung des historischen Datensatzes des AARI (seit 1932) im Abgleich mit den ozeanographischen Messungen (2007-2011) hinsichtlich des Einstroms von wärmerem Bodenwasser und seines Einflusses auf die klimatischen Veränderungen der Region Erweiterung des Ansatzes zur Abschätzung der Meereisproduktion aus ozeanographischen Parametern hinsichtlich des lateralen Salztransports durch möglichen Einstrom von wärmerem Bodenwasser mit Hilfe des historischen Datensatzes des AARI Messung des Wärmeflusses in der Polynja während der Expedition TRANSDRIFT XVIII und Verwendung der Daten zur Verbesserung des Ansatzes zur Abschätzung der Meereisproduktion aus ozeanographischen Parametern
	3	<ul style="list-style-type: none"> Auswertung der ozeanographischen Daten (Wassertemperatur, Salinität, $d^{18}O$) in Bezug auf mögliche Ursprungsgebiete der Wassermassen und Interpretation hinsichtlich der Wassermassenverteilung
Modellierung	1	<ul style="list-style-type: none"> Erweiterung des hydrodynamischen Transportmodells des AARI hinsichtlich der Meereisbedeckung Modellierung der großskaligen atmosphärischen Zirkulation über der eurasischen Arktis mit Hilfe des Atmosphärenmodells des Instituts für Atmosphärenphysik (Russische Akademie der Wissenschaften, Moskau) hinsichtlich des Einflusses des Polynjasystems und der Zunahme an Tiefdruckgebieten über dem Eurasischen Becken
	3	<ul style="list-style-type: none"> Interpretation der Modellergebnisse im Vergleich zu den Ergebnissen der Auswertung der Salzgehalts/$d^{18}O$-Signaturen und in Hinsicht auf Verteilung und Austausch der Wassermassen
	4	<ul style="list-style-type: none"> Erstellung von Vergleichsdaten für die Analyse des Eisexports aus der Laptev-See in den Arktischen Ozean mit Modell- und Fernerkundungsdaten

- Durchführung von Korrekturen russischer, englischer und deutscher Manuskripte und Berichte

Das Sekretariat „System Laptev-See“ führte für die deutschen und russischen Verbundpartner Korrekturen russischer, englischer und deutscher Manuskripte und Berichte durch.

- Übersetzen und Dolmetschen

Eine wichtige Teilaufgabe des Koordinationsteams war das Übersetzen der Fahrtanträge für die Expeditionen, die gemeinsam mit den Koordinatoren des russischen Partnerprojektes „System Laptev-See“ an die zuständigen russischen Ministerien gestellt werden müssen. Diese Anträge müssen in russischer Sprache verfasst sein. Außerdem mussten für alle Expeditionen Verträge in deutscher und russischer Sprache abgeschlossen werden. Die Verträge wurden gemeinsam mit den russischen Partnern aufgesetzt und übersetzt. Erhebliche Übersetzungsaufgaben wurden insbesondere im Rahmen der Abwicklung der temporären Einfuhr der Expeditionsfracht in die Russische Föderation getätigt.

Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Es sind keine relevanten Ergebnisse auf dem Gebiet bei anderen Stellen bekannt geworden.

TP 2: Reaktionen der Polynja-Systeme auf veränderte AntriebsgrößenEingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse

Das arktische Meereis zeigte im September 2012 die geringste Ausdehnung seit dem Beginn der Satellitenaufzeichnungen im Jahr 1979 (Jeffries et al., 2012). Dabei wurde ein besonders starker Rückgang beim mehrjährigen Eis beobachtet. Das neue Minimum trat auf, obwohl die Anomalien in den Oberflächentemperaturen der zentralen Arktis im Vergleich mit den Anomalien in den Jahren 2002 bis 2010 eher gering ausfielen und das Meereis im März 2012 noch eine große Ausdehnung aufwies. Auch die atmosphärischen Bedingungen unterschieden sich grundsätzlich von denen im Jahr 2007 – dem vorhergehenden Minimum in der Ausdehnung der Meereisdecke (Perovich et al., 2012). Im Gegensatz zu 2007 haben 2012 südliche Winde im Juni und ein Sturm im August wesentlich zum starken Rückgang des arktischen Meereises beigetragen.

In der Laptevsee führten die südlichen Winde zu einem starken Eisexport und einer nordwärts gerichteten Oberflächenströmung. Dadurch entstanden früh im Jahr große eisfreie Meeresgebiete, die sich in Folge der verstärkten Absorption der solaren Einstrahlung überdurchschnittlich erwärmten. So betrug die Temperaturanomalie des Oberflächenwassers der Laptevsee $\sim 2^{\circ}\text{C}$. Während die gleichen positiven Anomalien auch in der Kara- und Beaufortsee registriert wurden, trat in der Tschuktschensee 2012 eine negative Temperaturanomalie auf, die durch die längere Eisbedeckung dieses Seegebiets erklärt werden kann (Timmermans et al., 2012). Diese Beobachtungen verdeutlichen die enge Kopplung zwischen der Eisbedeckung und den ozeanischen Prozessen. Die genaue Beschreibung und Untersuchung des Wechselspiels von Eisbedeckung und Ozeandynamik war das zentrale Thema der wissenschaftlichen Arbeiten des Teilprojektes.

Die Eisproduktion in Polynjen wirklichkeitsnah zu berechnen, um so die dynamischen Prozesse besser zu verstehen, war dabei ein wichtiges Ziel. Darüber hinaus sollte untersucht werden, welche durch Meereisbedeckung gesteuerten, ozeanischen Prozesse den Energie- und Stofftransport in der Laptev-See dominieren. Auch die saisonale Entwicklung des Festeisgürtels, der eine wichtige Komponente des Atmosphäre/Eis/Ozean-Systems bildet, war noch nicht hinreichend verstanden und sollte deshalb detailliert beschrieben werden. Die Grundlage für die Untersuchungen bildeten Felduntersuchungen wie elektromagnetische Eisdickenmessungen, die Erfassung ozeanischer Prozesse mit Hilfe von Meeresobservatorien über einen weiteren Jahresgang sowie hochauflösende Radarbilder, Radarhöhenmessungen und

Modellsimulationen. Wichtige Meilensteine bildeten die Sommer- und die Winterexpeditionen, in deren Verlauf Messungen im Bereich des Festeises und der Polynja durchgeführt werden konnten.

Was sind die Ursachen für die Unterschiede zwischen Eisproduktionsabschätzungen aus Modellläufen und Satellitendaten?

Eine wichtige Teilaufgabe umfasste die Klärung der Ursache für Unterschiede zwischen Eisproduktionsabschätzungen aus Modellläufen und Satellitendaten. Hierfür wurden verschiedene Verfahren der Eisproduktionsabschätzung miteinander verglichen und deren Unsicherheit aufgezeigt. Die grundlegenden Probleme eines Vergleiches von verschiedenen Methoden zur Eisproduktionsabschätzung resultieren aus a) deren unterschiedlichen Definitionen von Polynjen und b) den Schwierigkeiten, die Eisproduktion im Feld zu quantifizieren und somit die Abschätzungen zu validieren. Es zeigte sich jedoch, dass die räumliche Auflösung der Satellitenmessungen es nicht erlaubt, kleinräumige Öffnungen im Eis (z. B. Eisrinnen) zu erfassen, und dass somit die Eisproduktion unterschätzt wird.

In Zusammenarbeit mit TP 4 wurden vorab Ergebnisse verschiedener satellitengestützter Methoden zur Bestimmung der Eisproduktion mit vor Ort gemessenen Eisdickendaten verglichen (Willmes et al., 2010). Die satellitengestützten Abschätzungen basieren auf visuellen Beobachtungen und auf Informationen aus dem Infrarot- und Mikrowellenbereich. Die vor Ort gemessenen Eisdicken wurden mittels eines elektromagnetischen (EM) Induktionsverfahrens erhoben. Diese geophysikalische Methode benutzt den Kontrast der elektrischen Leitfähigkeit von Meereis und dem Meerwasser zur direkten Bestimmung der Meereisdicke. Das elektromagnetische Instrument (EM-Bird), das mit Hilfe eines Helikopters über das Eis geflogen wurde, kam in der Laptev-See 2007 und 2012 zum Einsatz. Der Vergleich der Mess- und Fernerkundungsdaten ergab, dass insbesondere die Eisproduktionsrate in schmalen Polynjen und Eisrinnen von den satellitengestützten Methoden unterschätzt wird. Die Ursache hierfür liegt in der relativ groben Auflösung der Fernerkundungssensoren im Verhältnis zur geringen Größe der Öffnungen im Eis.

Um die Unsicherheit modellbasierter Eisproduktionsberechnungen genauer bestimmen zu können, wurde in Zusammenarbeit mit der Eidgenössischen Technische Universität (ETH) Zürich ein Verfahren entwickelt, das aus der Kombination von Feld- und Fernerkundungsdaten möglichst genaue Aussagen über die Eisproduktion zulässt. Hierfür wurden über längere Zeiträume die Position und Größe der in den Polynjen entstandenen Eisflächen mittels

hochauflösender Satellitenszenen gemessen. Am Ende des Winters 2008 und 2012 (April, TRANSDRIFT XIII und XX) wurden die so ermittelten Flächen dann mit dem EM-Bird überflogen. Die Kombination aus der gemessenen Dicke des Eises, dem Eisalter und der Flächengröße erlaubt eine genauere Quantifizierung des in den Polynjen entstandenen Eises (Abb. 1). Die Ergebnisse dieser Studie wurden 2013 veröffentlicht (Rabenstein et al., 2013).

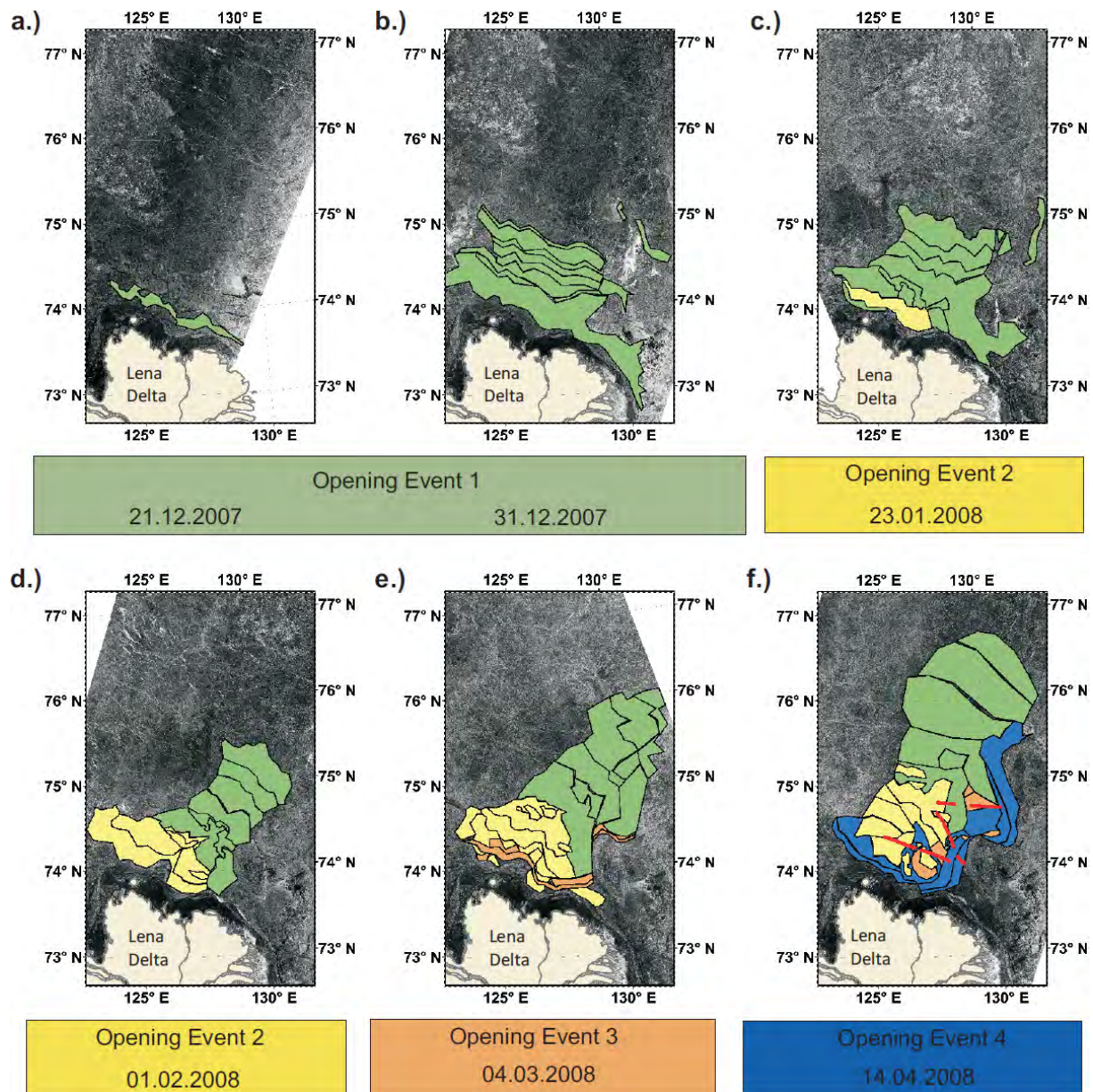


Abb. 1: Für die Bestimmung des Eisalters wurden über einen Zeitraum von ~130 Tagen die Position und Größe neugebildeter Eisflächen mittels hochauflösender Satellitenszenen (ENVISAT) gemessen. Im Anschluss (TRANSDRIFT XIII) wurden dann EM-Eisdickenmessungen (rote Linien) über den Eisflächen durchgeführt, um eine mittlere Eisdicke mit Flächen gleichen Alters assoziieren zu können (aus Rabenstein et al., 2013).

Ein Vergleich der Ergebnisse dieser Studie mit den Ergebnissen gekoppelter Eis/Ozean-Modelle (North Atlantic – Arctic Ocean – Sea-Ice Model, NAOSIM, Abb. 2) zeigte eine gute

Übereinstimmung (Rabenstein et al., 2013). Solange die Lage der Festeismaske korrekt vorgegeben wird und der atmosphärische Antrieb hinreichend genau ist, wird die Größenordnung der Eisproduktion korrekt eingeschätzt. Dies wiederum lässt den Schluss zu, dass auch die durch die Eisbildung gesteuerten ozeanischen Prozesse vom Modell beschrieben werden können. Die Überprüfung dieser Hypothese ist Gegenstand einer Doktorarbeit (P. Itkin), die 2013 abgeschlossen sein wird.

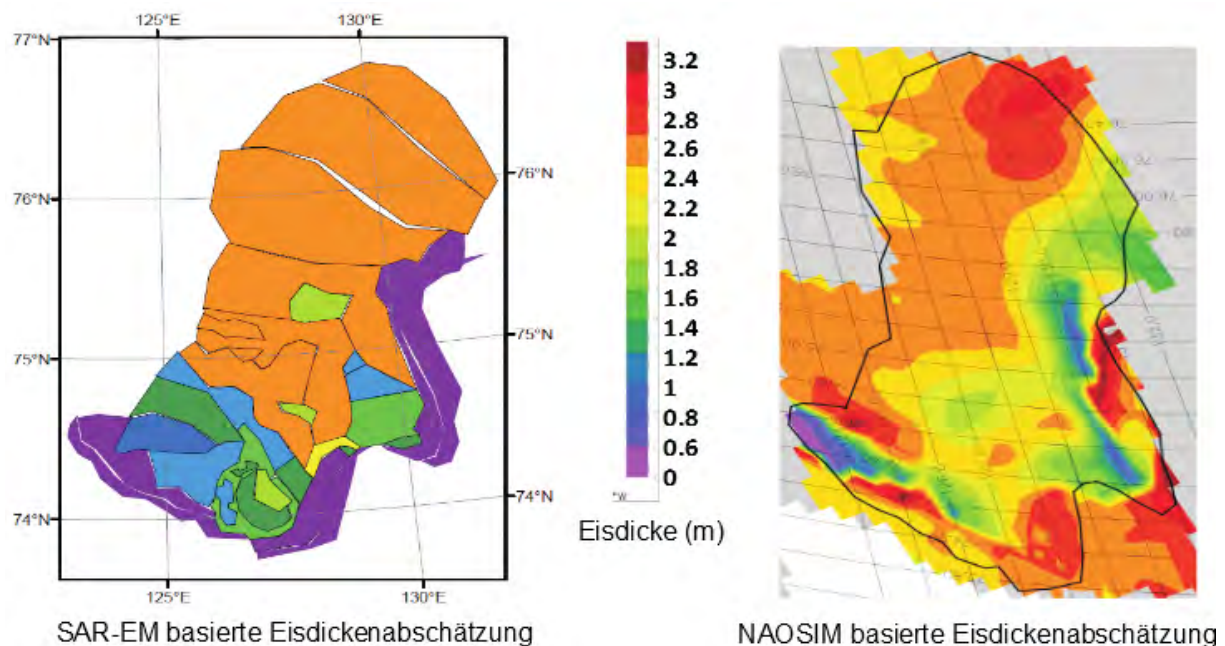


Abb. 2: Eisdicke der Eisflächen, welche im Winter 2008 über einen Zeitraum von 120 Tagen in der West-Neusibirische Polynja und der Anabar-Lena-Polynja entstanden sind. Die Farbkodierung entspricht der Eisdicke. Links: Eisdickenverteilung auf Basis von Satelliten-Informationen und im Feld gemessener Eisdicken. Rechts: Modellbasierte Eisdickenverteilung (NAOSIM).

Welche Prozesse steuern die Bildung und Ausdehnung des Festeises in der Laptev-See?

Ein weiterer Schwerpunkt des Teilprojekts lag in der Untersuchung der Bedeutung einzelner Prozesse für die Bildung von Festeis in der Laptev-See. Auch hier lag der Arbeitsansatz in der Kombination von Fernerkundungsdaten und Feldmessungen. Die Ergebnisse zeigen, dass vor allem der Windantrieb zu Beginn des Winters einen prägenden Einfluss hat.

Im Rahmen einer Masterarbeit (S. Antonova, POMOR Masterstudiengang für Polar- und Meereswissenschaften) wurde vorab die zeitliche und räumliche Variabilität des Festeises untersucht. Die Information über die Lage der Festeiskante in den jeweiligen Jahren wurde hochauflösenden Radar-Satellitenszenen entnommen (Abb. 3). Es zeigte sich, dass die auftretende jährliche Schwankung der Ausdehnung des Festeises durch Starkwindereignisse verur-

sacht wurde. Innerhalb des untersuchten Zeitraumes konnte jedoch kein signifikanter Trend der Festeisausdehnung festgestellt werden. Starke, ablandige Winde zum Winteranfang (November bis Dezember) fördern das dynamische Eisdickenwachstum (Eisdeformation). Eine starke Eisdeformation begünstigt wiederum das Aufsetzen von Eisrücken in flachen, offshore gelegenen Schelfbereichen. Die so gebildeten Eisinseln schränken dann die Bewegung im umliegenden frei driftenden Packeis stark ein, so dass sukzessiv eine geschlossene Festeisdecke entsteht.

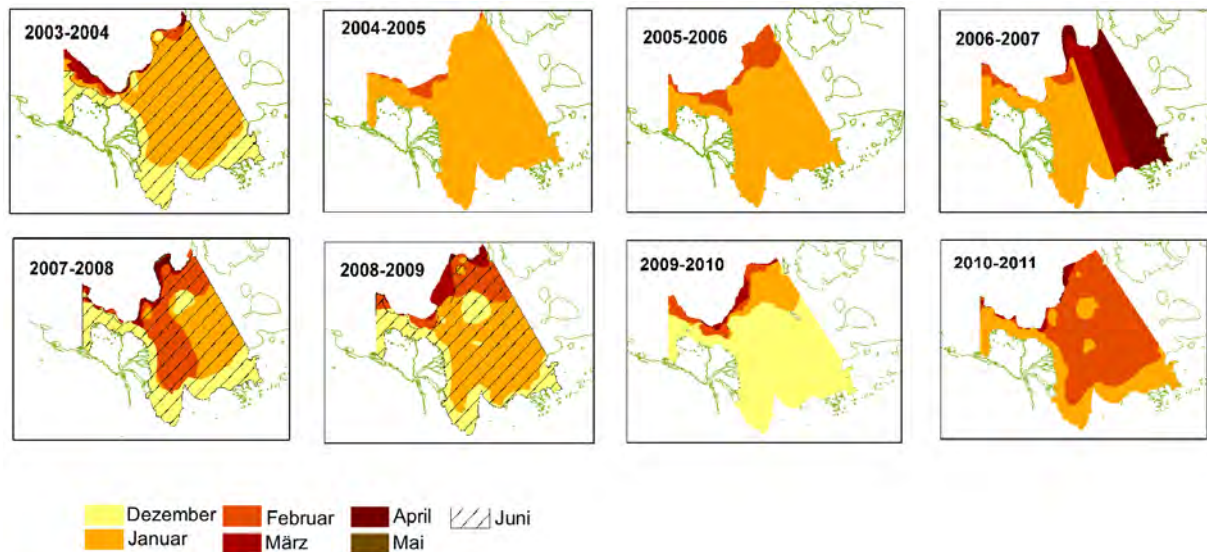


Abb. 3: Mittlere monatliche Festeisausdehnung in der südöstlichen Laptev-See, abgeleitet aus hochauflösenden Radar-Szenen für den Zeitraum 2003-2011.

Die Lage der Festeiskante entspricht anfangs häufig der 10-15 m Tiefenlinie (Abb. 4). Im Laufe des Winters verschiebt sich dann die Position der Festeiskante in tieferes Wasser und liegt später im Winter im Bereich einer Wassertiefe von 20-25 m. Während ablandige Winde zum Auflaufen von deformiertem Eis in flachen Meeresgebieten und damit zur anfänglichen Bildung des massiven Festeisgürtels beitragen, haben ablandige Winde im späteren Winter (Januar-April) den gegenteiligen Effekt. Nun bewirken ablandige Winde, dass immer wieder Teile des Eises abbrechen und nach Norden driften, während eine landwärts gerichtete Eisdrift das Packeis gegen die Festeiskante drückt und dort verankert. Durch den stetigen Wechsel der Windrichtungen entstehen so neue Festeiszonen. Die detaillierte Erfassung der Entstehung des Festeisgürtels im Winter 2011/2012 mit Hilfe von hochauflösenden Radar-Satellitenszenen diente auch als Grundlage für die Feldmessungen im Rahmen der Winterexpedition TRANSDRIFT XX. Zwischen dem 16. und dem 20. April wurden mit dem EM-Bird verschiedene Regionen des Festeises überflogen, um die Dicke des Festeises zu kartie-

ren. Die vorläufigen Ergebnisse bestätigen die Hypothese, dass vor allem die vorherrschenden lokalen Winde während der frühen Phase der Festeisbildung und das Auflaufen des Eises im Bereich von flachen Meeresgebieten die wesentlichen Faktoren für die Bildung und Stabilität des Festeisgürtels in der südöstlichen Laptev-See sind. Der Einfluss des großräumigen atmosphärischen Zirkulationsregimes auf das Festeis wurde ebenfalls untersucht. Ein direkter Zusammenhang konnte jedoch nicht nachgewiesen werden.

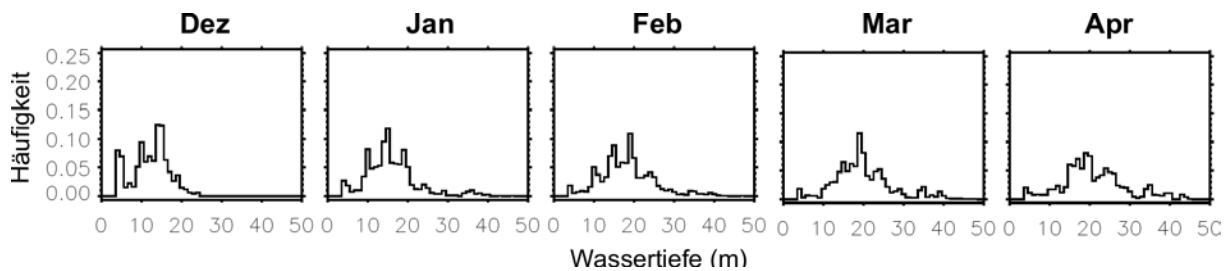


Abb. 4: Häufigkeitsverteilung der Wassertiefe an der Festeiskante für die einzelnen Wintermonate.

Eine weitere Masterarbeit (V. Selyuzhenok, POMOR Masterstudiengang für Polar- und Meereswissenschaften) befasste sich mit der automatisierten Ableitung der Lage der Festeiskante aus passiven Mikrowellendaten. Mit dem entwickelten Algorithmus lässt sich die winterliche Festeiskantenlage bis einschließlich 1978 bestimmen. Problematisch ist aber die relativ geringe räumliche und zeitliche Auflösung der Festeisinformation, wodurch kleinräumige und kurzzeitige Veränderungen im Festeis nicht oder nur unzureichend aufgelöst werden. Zurzeit wird der Algorithmus im Rahmen einer Doktorarbeit (V. Selyuzhenok) hinsichtlich seiner Anwendbarkeit weiter verbessert. Auch die Arbeiten zum Thema Einfluss von Ozeanographie, Atmosphäre und Bathymetrie auf die Festeisbildung werden weiter fortgeführt.

Können Satellitendaten der Eisdicke durch Feldmessungen in der Laptevsee verbessert werden?

Weitere Untersuchungen befassten sich mit der Validierung von CryoSat- und SMOS (Soil Moisture Ocean Salinity)-Eisdickenprodukten. Hierfür sollten während des Winterexperiments im Frühjahr 2012 erneut EM-Eisdickenmessungen mit dem Helikopter über der Polynja und dem Packeis durchgeführt werden. Die bisherige Auswertung zeigte dabei eine gute Übereinstimmung der Messungen.

Das neue Satelliteninstrument SMOS benutzt eine deutlich niedrigere Mikrowellenfrequenz (1 GHz) als alle anderen satellitengetragenen Mikrowellenradiometer, so dass Eis-

dickenabschätzungen bis zu einer Dicke von 50 cm möglich sind. Die von den Universitäten Hamburg und Bremen entwickelten Algorithmen zur Eisdickenbestimmung bedürfen allerdings einer Validierung. Auf Grund der groben Auflösung des SMOS-Radiometer von 60 km pro Pixel werden hierfür aber Eisdickeninformationen extrem großer Dünneisflächen benötigt, wie sie nur in Gebieten großer Polynjen der russischen Schelfe zu finden sind. Während der TRANSDRIFT-XX-Kampagne gelang es erneut, solche Messungen über einer Polynja durchzuführen. Hierfür wurde vorab ein Treibstoffdepot an der Festeiskante eingerichtet, um eine möglichst große Helikopterreichweite zu ermöglichen. Ein erster Vergleich der gewonnenen EM-Eisdicken mit SMOS-Eisdicken zeigt eine gute Übereinstimmung (Abb. 5). Nun sollen aus den Dicken-Verteilungsfunktionen der EM-Daten Rückschlüsse über Unsicherheiten der SMOS-Eisdicken gezogen werden. Eine Publikation der Ergebnisse ist geplant.

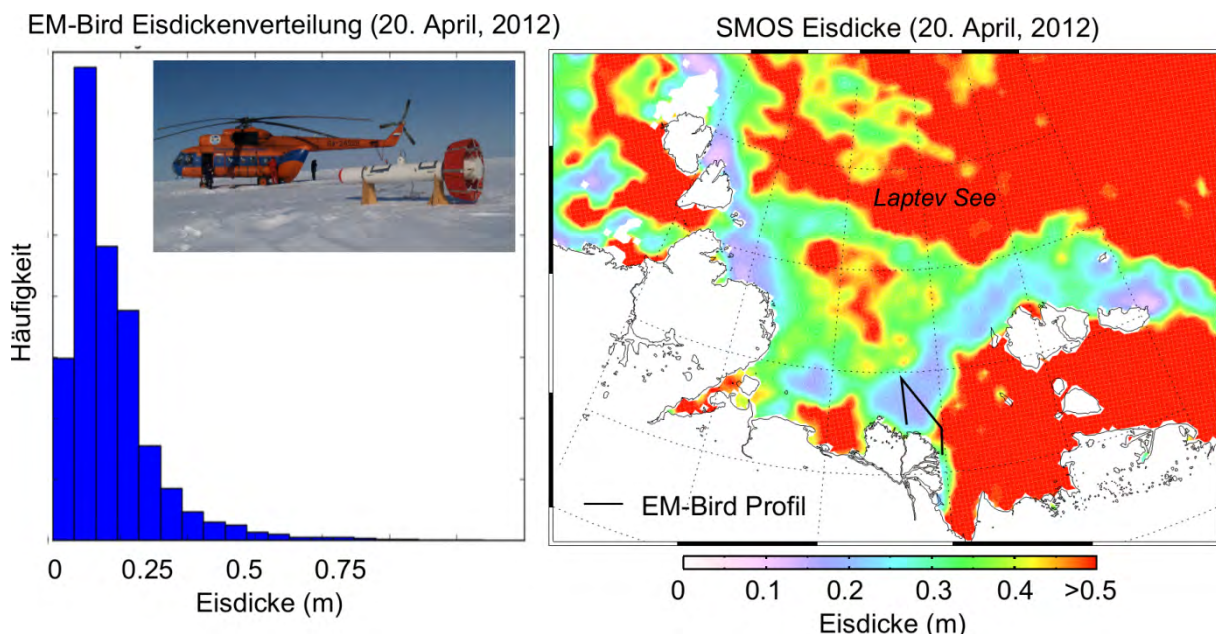


Abb. 5: Links: Eisdickenverteilung eines Messfluges mit dem EM-Bird (Bild) über der Anabar-Lena-Polynja am 20. April 2012. Rechts: SMOS-Eisdicke für den Tag des EM-Überfluges. Die Position des EM-Transektivs ist durch eine schwarze Linie gekennzeichnet.

Ein Ziel war es auch, CryoSat-2, eine Altimeter-Mission, die hauptsächlich der Bestimmung von dickem, mehrjährigem Eis dient, hinsichtlich seiner Anwendbarkeit für die Dünneisbestimmung zu überprüfen. Leider sind die bis dato verfügbaren CryoSat-2-Eisdicken jedoch zu ungenau, um über dem russischen Schelf angewendet werden zu können. Eine genauere Bestimmung bedarf vor allem exakterer Daten der Schneedicke und der Gezeiten.

Welche ozeanischen Prozesse dominieren den Energie- und Stofftransport auf dem Schelf der Laptev-See, und werden diese Prozesse durch die Meereisbedeckung gesteuert?

Insbesondere die neuesten Beobachtungen der Meeresobservatorien erwiesen sich als außerordentlich wertvoll und führten zu neuen Erkenntnissen hinsichtlich der ozeanischen Zirkulation auf dem Laptev-See-Schelf und der Rolle der Eisbedeckung (Janout et al., 2013). Die ganzjährig dominierenden Transportprozesse in der Laptev-See sind windgetrieben. Winde treiben im Sommer die horizontalen Strömungen an und sorgen im Zusammenspiel mit den Gezeitenströmungen für eine vertikale Mischung des Wasserkörpers. Bei Eisbedeckung verursachen die Winde eine Bewegung des Eises, dessen Impuls auf die obere Wasserschicht übertragen wird. Somit entsteht auch unter dem Eis eine windgetriebene Strömung.

Auf Grund von fehlenden Beobachtungen war die Zirkulation unter der Meereisbedeckung in der Laptev-See weitgehend unbekannt. Es wurde jedoch vermutet, dass der Ozean im Bereich des Packeises mit einsetzender Eisbedeckung von der Atmosphäre fast vollständig entkoppelt wird und Stoff- und Energietransporte größtenteils windgetrieben sind und deshalb vorwiegend im Sommer stattfinden. Jüngste Auswertungen der Meeresobservatorien zeigten allerdings starke Strömungen unter einer nahezu vollständigen Eisbedeckung. Die Messdaten belegten darüber hinaus einen Zusammenhang zwischen der windgetriebenen Bewegung des Eises, den Bodenströmungen und der Schichtung in der Wassersäule.

Salz- und Temperaturmessungen am Boden in Zusammenschau mit Messdaten der Strömung am Meeresobservatorium KHATANGA in der Polynja nördlich des Lena-Deltas zeigten in den Jahren 2009/2010 einen plötzlichen starken Anstieg in der Temperatur (von -1,6 auf -0,9°C) und im Salzgehalt (von 29,5 auf 33 psu) des Bodenwassers (Janout et al., 2013; Abb. 6).

Diese Änderungen erreichten die Verankerungsposition mit einer ~10 m mächtigen und ~20 cm/s schnellen Bodenströmung im Februar 2010. In den nächsten Monaten folgten weitere dieser signifikanten Strömungsereignisse. Im Juni wurden dann vergleichbar deutliche Änderungen in der Bodenhydrographie des 100 km entfernten, östlich gelegenen Meeresobservatoriums ANABAR gemessen. Temperatur- und Salzgehaltsdaten, die während der Sommerexpedition im September 2009 gemessen wurden, lassen vermuten, dass die warme und salzreiche Wassermasse vom Kontinentalhang der nordwestlichen Laptev-See bis in den inneren Schelf transportiert wurde. Anhand der Analyse der „Bottom track“-Daten der ADCP, die die Eisbewegung erfassen, sowie Wind- und Bodendruckdaten ergab sich ein genaueres Bild über den zugrundeliegenden, antreibenden Mechanismus. Bei jedem der

erfassten starken Strömungsereignisse traten ablandige Winde und daran gekoppelt eine ablandige Eisdrift auf. Gleichzeitig wurde eine Absenkung des Drucks am Meeresboden gemessen, der durch die windgetriebene Absenkung des Meeresspiegels an der Verankerungsposition verursacht wurde (Abb. 7).

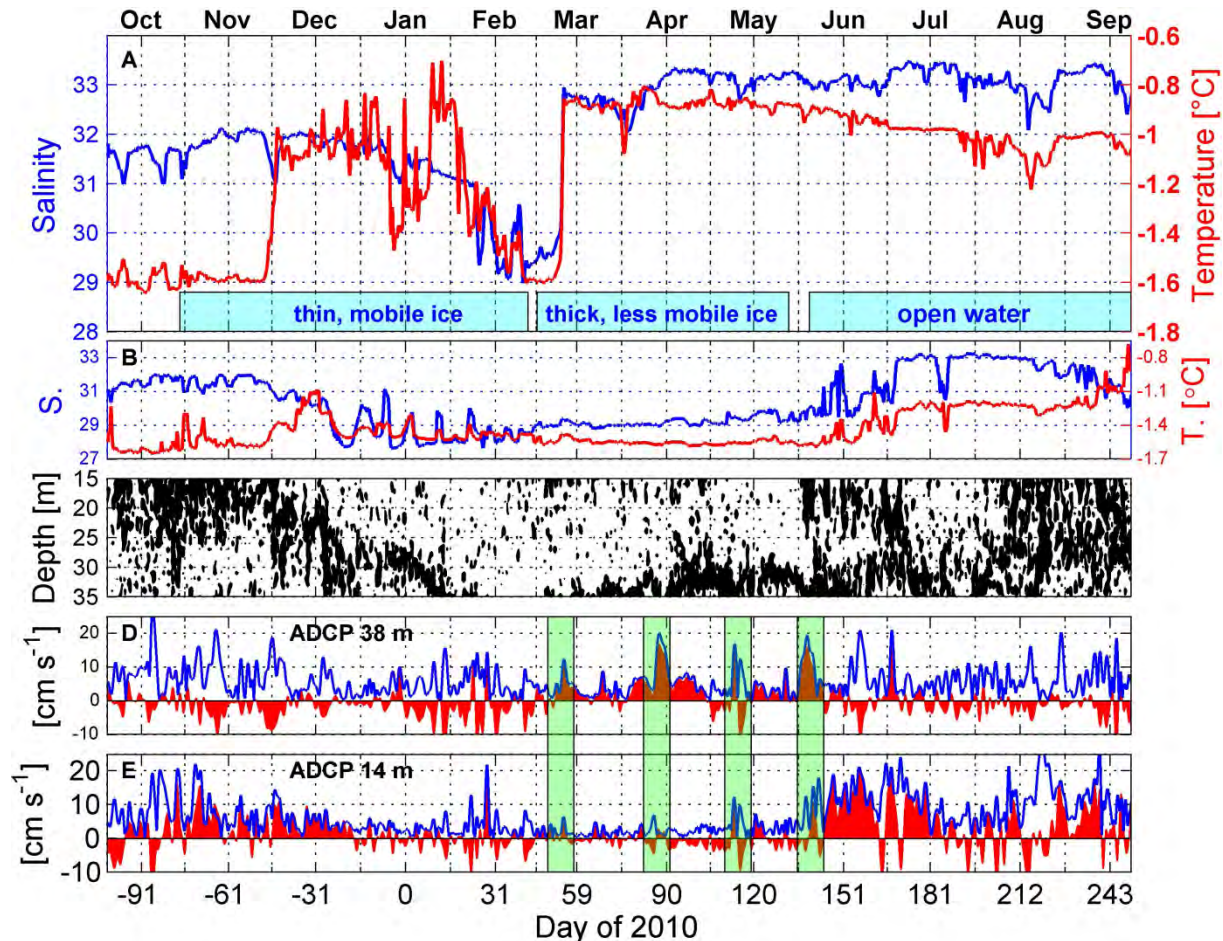


Abb. 6: Temperatur [°C] (rot) und Salzgehalt (d. h. Salinität; blau) in Bodennähe der Station a) KHATANGA und b) ANABAR; c) schwarze Konturen zeigen Scherungsstärke ($\geq 0,1 \text{ s}^{-1}$), berechnet mittels der ADCP-Daten; ADCP-Strömungsgeschwindigkeit [cm s^{-1}] (blau) und die „Down-channel“-Komponente (rot) entlang der Hauptachse (160°) in d) 38 m und e) 14 m Wassertiefe. Positive Geschwindigkeiten zeigen anlandige Strömung. Schattierte Bereiche in d) und e) markieren die Starkstromereignisse. Die X-Achse zeigt den Tag in Bezug auf den 1. Januar 2010 (Tag 31 ist der 31. Januar 2010; Tag -31 ist der 1. Dezember 2009). Die schattierten Bereiche in a) skizzieren die Eisbedeckung. Abbildung aus Janout et al. (2013).

Der treibende Prozess ist demnach der wind- bzw. eisgetriebene Abstrom von Wasser aus der Deckschicht. Dies führt zu einem Druckgradienten, der wiederum eine kompensierende Strömung unterhalb der Dichtesprungschicht (Pyknokline) verursacht (Abb. 8). Dieser Mechanismus verdeutlicht, dass die Mobilität des Meereises eine entscheidende Rolle für die Winterzirkulation auf dem Schelf der Laptev-See spielt.

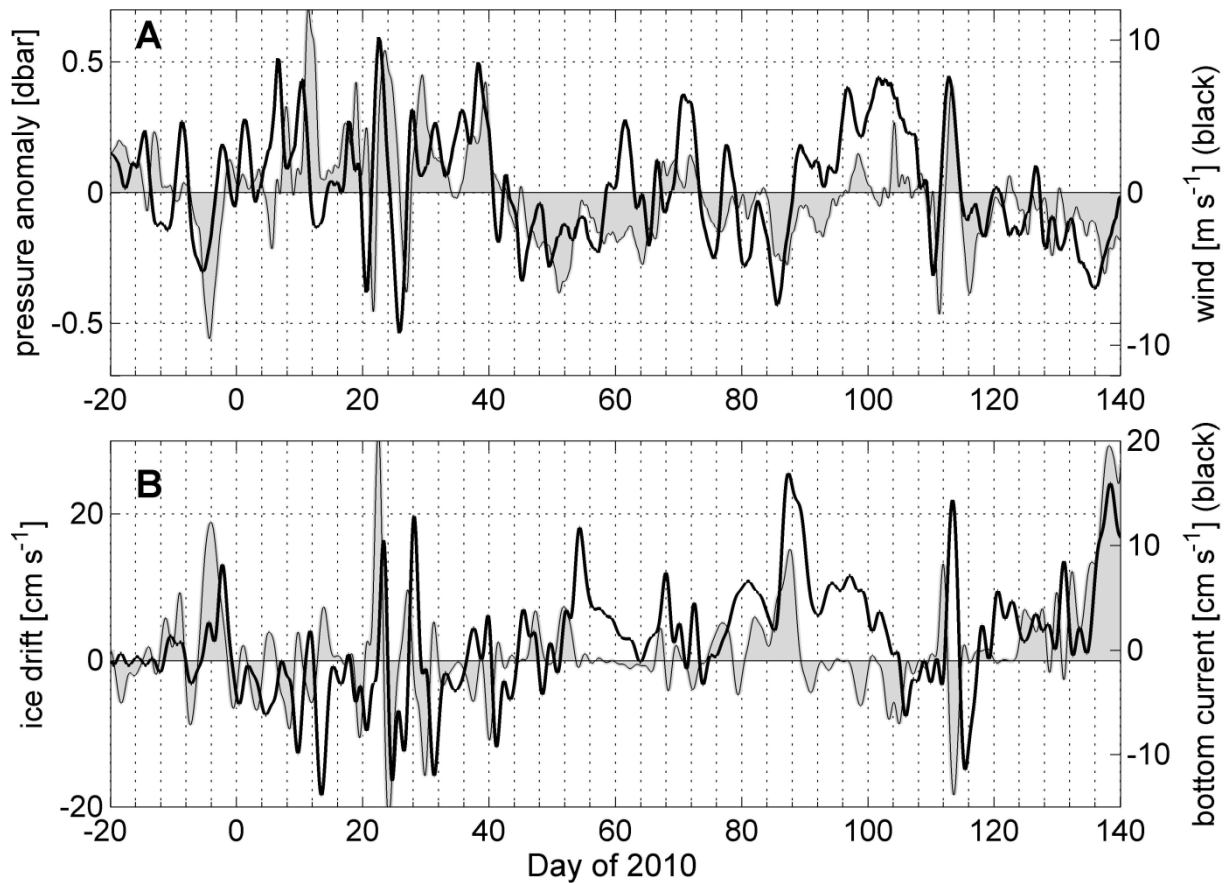


Abb 7: a) Anomalien im Bodendruck (grau) und NCEP-Wind (Schwarz), b) meridionale Meereisdriftgeschwindigkeit [cm s^{-1}] abgeleitet vom ADCP im “Bottom-Track-Mode” (grau, positive Werte bedeuten eine nordwärts gerichtete Drift) und bodennahe Strömungen [cm s^{-1}] (schwarz) gegen Tage im Jahr 2010. Abbildung aus Janout et al. (2013).

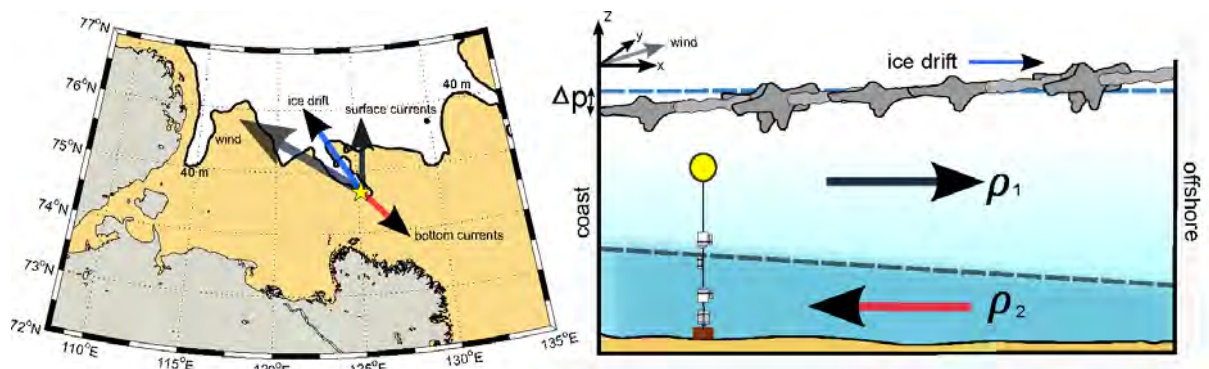


Abb 8: Links: Schematischer Überblick über den Einfluss von ablandigen Winden auf die Wassersäule. Die Pfeile zeigen die generelle Richtung des Windes und der Eisdrift sowie der Oberflächen- und Bodenströmungen während starker Stromereignisse nahe des KHATANGA-Meeresobservatoriums (gelber Stern). Die Schattierung markiert Wassertiefen von < 40 m. Rechts: Die Skizze zeigt eine geschichtete Wassersäule unter dem Einfluss ablandiger Winde (nach NW), wobei die Küste links liegt. Die Bewegung des Eises und die Strömung oberhalb der Dichtesprungschicht verlaufen entsprechend der Windrichtung. Die dadurch verursachte Meeresspiegelabsenkung wird durch eine nach SW verlaufende Strömung in Bodennähe kompensiert. Aus Janout et al. (2013).

Welchen Einfluss hat die Festeiszone auf die ozeanische Dynamik der Laptev-See?

Die Festeiszone hat einen prägenden Einfluss auf die Dynamik der Laptevsee. Einerseits ist die Festeiskante eine Region, die einen starken Einfluss auf Eisbildung, Strömungen, Salzumverteilung und die Durchmischung der Wassersäule hat. Dort öffnen sich im Frühjahr Polynjen, so dass starke Salzumverteilung und Eisbildung stattfinden. Zum anderen verursacht das Festeis eine vollständige Entkopplung des Ozeans von der Atmosphäre. Transportmechanismen, wie sie im Bereich des Packeises beschrieben wurden, basieren auf der Mobilität des Eises und finden unter dem Festeis nicht statt. Dies reduziert die Transport- und Mischungsprozesse unter dem Festeis auf Gezeiten und barokline (dichtegetriebene) Strömungen. Das Festeis und das in den Polynjen neu gebildete Eis blockieren bei nördlichen Winden auch die südwärts gerichtete – auf die Küste zulaufende – Eisdrift. Bodenströmungen, die als Kompensationsströmungen in Folge der Bewegung des Eises (und der dadurch verursachten Strömung an der Meeresoberfläche) auftreten, können im Winter somit nur in Richtung des Festlandes verlaufen.

Studien des russischen Partners (Kirilov et al., 2013) zeigen, dass an der Festeiskante verstärkte Durchmischung stattfindet, so dass relativ zu benachbarten Regionen sehr starke Gradienten in Temperatur und Salzgehalt auftreten. Diese werden dann von Gezeiten innerhalb der Polynja transportiert, was die Festeiskante ozeanographisch zu einer weitaus komplexeren Region macht als die vom Fest- und Packeis bedeckten Gebiete. Die vielfältigen dynamischen Prozesse und Gradienten im Bereich der Festeiskante erlauben es daher nicht, aus Änderungen des Salzgehaltes in der Deckschicht genaue Rückschlüsse auf die lokale Eisproduktion innerhalb der Polynja zu ziehen (Kirillov et al., 2013).

Wie groß ist die Auswirkung wind- und gezeitengetriebener vertikaler Mischungsprozesse auf die ozeanische Dynamik in der westlichen und östlichen Laptev-See?

Durch Probleme bei der Bergung der Meeresobservatorien können wir keine eindeutige Schlussfolgerung in Bezug auf die Mischungsprozesse der westlichen und östlichen Laptev-See ziehen. Vorläufige Analysen ergeben allerdings, dass insbesondere die gezeitengetriebene Vermischung in der westlichen Laptev-See weitaus höher ist als auf dem zentralen Schelf.

Vor dem Eintreffen der salzreichen und warmen Wassermasse im Februar 2010 fand eine zunehmende Vermischung der Wassersäule statt, obwohl Satellitendaten eine bereits vollständige Eisbedeckung zeigten. Wir vermuten, dass eine Reihe von vertikalen Mischungsprozessen (wie die turbulente Durchmischung durch die Bewegung von Presseisrücken, Gezeiten-

strömungen und Wind sowie konvektive Durchmischung auf Grund von Salzlaugen) zusammenwirkt und so zu einem sukzessiven Absinken der Pyknokline führt. Das Absinken der Pyknokline spiegelt sich auch in der Veränderung der Tiefenlage der maximalen Geschwindigkeitsscherung wider, die in den Langzeitdatensätzen der Region beobachtet wurde (Abb. 6C). Die Wassersäule am Meeresobservatorium ANABAR wird auf Grund der geringeren Wassertiefe (33 m) und der direkten Lage in der Polynja schneller durchmischt als die am Observatorium KHATANGA (43 m). Die Langzeitströmungsdaten zeigen deutlich, dass Gezeiten eine wesentliche Rolle auf dem zentralen Laptev-See-Schelf spielen. Allerdings sind die Anteile der einzelnen Prozesse, die zur Durchmischung beitragen, noch nicht quantifiziert.

Auf Grund der Bedeutung des vertikalen Stoff- und Energietransportes in einem saisonal eisbedeckten Schelfmeer für die Meereisbildung sowie der Verteilung des Lena-Flusswassers für die Arktis ist die Fragestellung des Teilprojektes auf regionale Unterschiede von wind- und gezeitengetriebener Durchmischung von großer Bedeutung. Da auf Grund von äußeren Umständen eine Bergung aller Meeresobservatorien während der Sommerexpedition 2011 nicht möglich war, kann diese Frage allerdings noch nicht vollständig beantwortet werden. Vorläufige Auswertungen der vorhandenen Datensätze in Verbindung mit Ergebnissen eines allgemein akzeptierten Gezeitenmodell (AOTIM5, Padman & Erofeeva, 2004) deuten an, dass Gezeitenvermischung eine wichtige Rolle in der Laptev-See spielt. Die Modellergebnisse zeigen jedoch auch, dass die Gezeiten starke regionale Unterschiede aufweisen. Dies wird hauptsächlich durch lokale topographische Begebenheiten und die weiten Entfernungen, die eine Gezeitenwelle vom Kontinentalhang über flaches Gebiet bis zur Küste zurücklegen muss, erklärt. Modellergebnisse zeigen die stärksten Gezeiten in der westlichen Laptev-See und – etwas schwächer – auf dem äußeren Schelf, während die Regionen um das Lena-Delta nur schwache Gezeiten aufweisen. Dies bedeutet, dass die gezeitengetriebene Durchmischung der Wassersäule in der westlichen Laptev-See am stärksten ist. Allerdings sind die regionale Variabilität der Dichteschichtung der Wassersäule sowie der Einfluss der Schichtung auf die Mischung durch die Gezeiten noch nicht vollständig verstanden.

Können die Energie- und Salztransporte auf dem Schelf sowie die Meereisbedeckung realitätsnah in numerischen Modellen simuliert werden?

Diese Frage kann noch nicht abschließend beantwortet werden, da die neusten Erkenntnisse hinsichtlich der Energie- und Salztransporte und der Meereisbedeckung noch nicht in Modellen nachgeprüft sind. Auf Grund der Beobachtungen kann angenommen werden, dass

die Mobilität der Eisbedeckung einen entscheidenden Einfluss auf die dreidimensionale Zirkulation der Laptev-See hat. Diese Beobachtungen zeigen, dass eine realistische Einfügung des Festeises und der Eismobilität in numerischen Modellen unbedingt notwendig ist, um die ozeanische Winterzirkulation realistisch simulieren zu können. Dank der Fernerkundung von Meereis, dem groben Verständnis der Gezeiten sowie steigender Rechenleistung sollte eine realistische Simulation in erster Annäherung erwartet werden können. Allerdings zeigen die erhobenen Daten aus der Laptev-See eine Reihe komplexer Zustände, die bislang nur sehr schwer in Modelle zu integrieren sind.

Die Eis/Ozean-Kopplung geschieht über den Strömungswiderstandskoeffizienten, der von der Rauigkeit der Unterseite des Eises abhängig ist. Mangels Beobachtungen wird dieser Koeffizient in numerischen Modellen stark vereinfacht (parametrisiert), und weitere Langzeitbeobachtungen des Meereises (insbesondere Dicke und Rauigkeit) sind nötig, um die Modellierung zu verbessern. Des Weiteren zeigen die Daten starke horizontale und vertikale Gradienten, die wiederum Strömungen auf kleinen Skalen hervorrufen können.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Daten der letzten Jahre unser Verständnis der dominierenden Prozesse stark verbessert haben. Der nächste Schritt zur Verbesserung der Modellierung muss jetzt sein, Modellergebnisse auf die beschriebenen Prozesse hin zu überprüfen.

Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Arbeiten im TP 2 sind der Grundlagenforschung zuzuordnen. Die Verwertbarkeit der Daten und Produkte betrifft in erster Linie die nicht-kommerzielle Nutzung durch die internationale Klimaforschung.

Das Projekt leistet einen Beitrag als Teil eines Beobachtungssystems, das die Entwicklungen der marinen Umwelt in einer für den europäischen Raum relevanten Region erfasst. Die Ergebnisse des TP 2 werden verwendet um die Veränderungen der Umwelt in der Laptev-See anhand historischer Daten, ozeanographischer Langzeitbeobachtungen, Fernerkundungsdaten und Simulationen von Zukunftsszenarien quantitativ abzuschätzen. Die Arbeiten erfolgten durch die Auswertung vorhandener Daten und die Weiterführung von Messungen, die auch in internationale Programme (Second International Conference on Arctic Research Planning – ICARP II, Arctic Monitoring Assessment Program – AMAP, Sustaining Arctic Observing Network – SAON) eingebunden sind. Die aufgearbeiteten Messdaten werden nach ihrer Freigabe durch die zuständigen russischen Behörden an die nationale Datenbank (DOD)

geschickt, und von dort weiter an das „World Data Center (WDC) for Oceanology“ geleitet.

In Kooperation mit der Modellierungsgruppe am AWI wird das NAOSIM-Modell für die regionale Anwendung in der Laptev-See weiterentwickelt. Das Modell gilt als eines der schlagkräftigsten Eis/Ozean-Modelle. Einen Schwerpunkt bildet die Assimilation der ozeanographischen und Meereisbeobachtungen in NAOSIM und die Erstellung eines zeitlich-räumlichen Datensatzes, der sich für die Analyse des ozeanischen Zustandes, seiner Veränderlichkeit und der relevanten ozeanischen Prozesse eignet. Dies geschieht in enger Zusammenarbeit mit der HGF-Klimainitiative „Regional Climate Change: from Observations and Modelling to Decision Support for Mitigation and Adaptation“. Die Simulationsergebnisse werden auch in den öffentlich zugänglichen Datenbanken des AWI (PANGAEA) archiviert.

Die während der TRANSDRIFT-Winterexpedition erhobenen Felddaten (EM-Eisdickendaten, Temperaturinformationen) werden dazu verwendet, die aus Satelliten abgeleiteten geophysikalischen Informationen zu überprüfen. So sollen die während der Winterexpedition registrierten Dünneisdickendaten herangezogen werden, um SMOS-Algorithmen („Soil Moisture and Ocean Salinity“-Satellit) zur Dünneisdickenbestimmung zu entwickeln. Die Arbeiten basieren auf einer Kooperation zwischen der ESA, der Universität Hamburg und dem AWI (ESA Referenz EOP-SM/1953). Auch die Zusammenarbeit mit dem Deutschen Luft und Raumfahrtzentrum (DLR), wurde weiter ausgebaut.

Die aus dem Projekt resultierenden Ergebnisse sollen für die weitere Verwertung wie folgt zur Verfügung stehen:

- Publikation in begutachteten Zeitschriften;
- Bereitstellung von Validationsdatensätzen für andere Teilnehmer des Verbunds und für die internationale Arktis- und Klimaforschung im nationalen Datenzentrum und in internationalen Daten-Management-Projekten (Climate and Cryosphere – CliC, Developing Arctic Modeling and Observing Capabilities for Long-Term Environmental Studies – DAMOCLES).

Die in diesem Projekt durch Beobachtungen und Modellsimulationen gewonnenen Daten und abgeleiteten Größen werden neue Referenz für die Vorhersagbarkeit von Auswirkungen der Klimaänderungen in der Arktis darstellen. Der zukünftige Wert der in diesem Projekt erhobenen Messungen liegt auch in ihrer Eigenschaft, als Grundstock für zukünftige Zeitserien zu dienen, die für die Diskussion von Schwankungen im Ozean und im Klimageschehen Voraussetzung sind. Durch den Einsatz von Meeresobservatorien im projektübergreifenden nationalen und internationalen Verbund ist für eine hinreichende Abdeckung gesorgt und

eine kontinuierliche Fortsetzung der Zeitreihen ist wahrscheinlich. Die Modellergebnisse der Atmosphäre/Eis/Ozean-Wechselwirkungen im Bereich der sibirischen Schelfmeere eröffnen die Möglichkeit der Vorhersage von Veränderungen in der großräumigen ozeanischen Zirkulation und Eisproduktion mit einem Vorlauf von einigen Jahren. Damit wäre ein Frühwarnsystem denkbar, das Veränderungen in der Laptev-See nutzt, um einen Teil der Veränderungen der Arktis und der angrenzenden Gebiete anzuzeigen. Modellrechnungen mit bestimmten Annahmen über die atmosphärische Variabilität während des Vorhersagezeitraums können Wahrscheinlichkeitsabschätzungen für den Zeitpunkt des Eintretens und die Stärke von Veränderungen liefern.

Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Es sind keine relevanten Ergebnisse auf dem Gebiet bei anderen Stellen bekannt geworden.

TP 3: Isotopengeochemische Signaturen – Wassermassenbildung für den Arktischen Ozean

Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse

In der Laptev-See-Polynja wurde mit stabilen Sauerstoffisotopen ($\delta^{18}\text{O}$) die Bildung der für die arktische Halokline relevanten Wassermassen untersucht und die Veränderungen nach 2007 durch Probennahmen in einem Sommer/Winter/Sommer-Jahresgang erfasst. Die salzreichen Wassermassen, welche durch Meereisbildung in der Polynja-Region der Laptev-See entstehen, wurden quantifiziert. Die gemeinsame Interpretation von Salzgehalt und $\delta^{18}\text{O}$ -Werten über die gesamte Wassersäule erlaubt es, den Beitrag von Flusswasser und Meereisschmelzwasser abzuschätzen. Mittels des Vergleichs von Winter- und Sommergebietungen wurden Budgets zur Gesamtmenge des gebildeten Meereises und der so gebildeten Wassermassen berechnet. Der Vergleich mit atmosphärischen Antriebsdaten und insbesondere mit dem Transport von advektierten Wasserkörpern ermöglichten es, die steuernden Prozesse der Wassermassenverteilung und -bildung in der Laptev-See zu identifizieren. Wesentliche Ergebnisse des Teilprojektes sind:

- Die Struktur der Wassermassen in der zentralen Laptev-See werden nicht primär von der Menge des gebildeten Meereises gesteuert (Bauch et al., 2012), sondern sind stark von den Vorbedingungen des vorausgehenden Sommers geprägt. Zudem spielen Advektionsraten eine wichtige Rolle (Bauch et al., 2010);
- Trotz starker zwischenjähriger Variabilität des Gesamt-Süßwasserbudgets bleibt das Budget der Meereisbildung von Jahr zu Jahr weitgehend konstant (Bauch et al., in press);
- Eine entscheidende Rolle in der saisonalen lokalen Eisschmelze spielen Flusswassermenge und -verteilung (Bauch et al., in press). Der Rückgang und die Ausdehnung der sommerlichen Eisdecke werden von anderen Faktoren kontrolliert.

Die Ergebnisse werden in den folgenden Abschnitten eingehender dargestellt.

Winterbeobachtungen: Polynja-Aktivität und Wassermodifikation auf dem Laptev-See-Schelf

Die stabilen Sauerstoffisotope der Winterdaten zeigen den unterschiedlichen Einfluss der Eisbildung und der Flusswasseranteile auf die Wassermischung im April/Anfang Mai 2008 und April/Anfang Mai 2009 (Bauch et al., 2012). In der Korrelation zwischen Salzgehalten und $\delta^{18}\text{O}$ ist eine Unterteilung in zwei Mischungslinien zu sehen (Abb. 1b und 2b), welche durch

Mischung von drei Endgliedern bestimmt wird. Das marine Endglied mit relativ hohen Salzgehalten vom äußeren Schelf und das Süßwasser-Endglied mischen sich auf dem Schelf mit einem dritten lokalen Endglied, welches stark durch Eisbildung in der Polynja geprägt ist.

Eine vertikale Mischung der Wassersäule sowie ein windgetriebener Einstrom einer salinen bodennahen Wassermasse wurde im Verlauf der Winterexpedition 2008 beobachtet (Dmitrenko et al., 2010b). Am Anfang der Messkampagne war die einströmende saline Wassermasse relativ kalt (Abb. 1, obere Reihe) und ist deutlich in der veränderten Steigung im Salzgehalt/ $\delta^{18}\text{O}$ -Mischungsschema (Abb. 1, obere Reihe, b) sichtbar. Nach einer Phase direkter Polynja-Aktivität mit Durchmischung der Wassersäule (Abb. 1, mittlere Reihe) ist erneut ein Einstrom von salinem und relativ warmem Bodenwasser erkennbar (Abb. 1, untere Reihe, Panel a). Beide einströmenden Bodenwässer fallen exakt auf dieselbe Mischungslinie und zeigen relativ geringe Anteile von Meereisbildung und Flusswasser (Abb. 1, Panel c) und stammen daher trotz der unterschiedlichen Temperaturen beide vermutlich vom äußeren oder westlichen Schelf. Aufgrund der isotopisch identischen Signatur kann darüber spekuliert werden, ob beide Wasserkörper auch einen identischen Ursprung haben, jedoch auf dem Schelf aufgrund der generell hohen Temperaturschwankungen (Hölemann et al., 2011) jeweils entsprechend unterschiedlich modifiziert wurden.

Während der Expedition TRANSDRIFT XV (2009) wurde der Einfluss der Meereisbildung nur bis in die mittleren Wassertiefen beobachtet. Nur an zwei flachen Stationen ist das Signal der Meereisbildung auch im bodennahen Wasser erhöht. Die starke Wasserstratifikation, die vom vorhergehenden Sommer stammt, hat im Spätwinter 2009 den Einfluss der Polynja-Aktivität auf die mittleren Wasserschichten beschränkt. Die zeitliche Entwicklung der Wassersäule während des Verlaufs der Polynja-Aktivität im April 2009 konnte für eine Position exemplarisch beobachtet und analysiert werden (Abb. 2). Schrittweise steigt das Signal der Meereisbildung zusammen mit dem Salzgehalt im oberflächennahen Wasser an. Der gleichzeitige Abfall des Flusswasseranteils ist durch die Advektion von Wassermassen mit leicht geringerem Flusswasseranteil zu erklären.

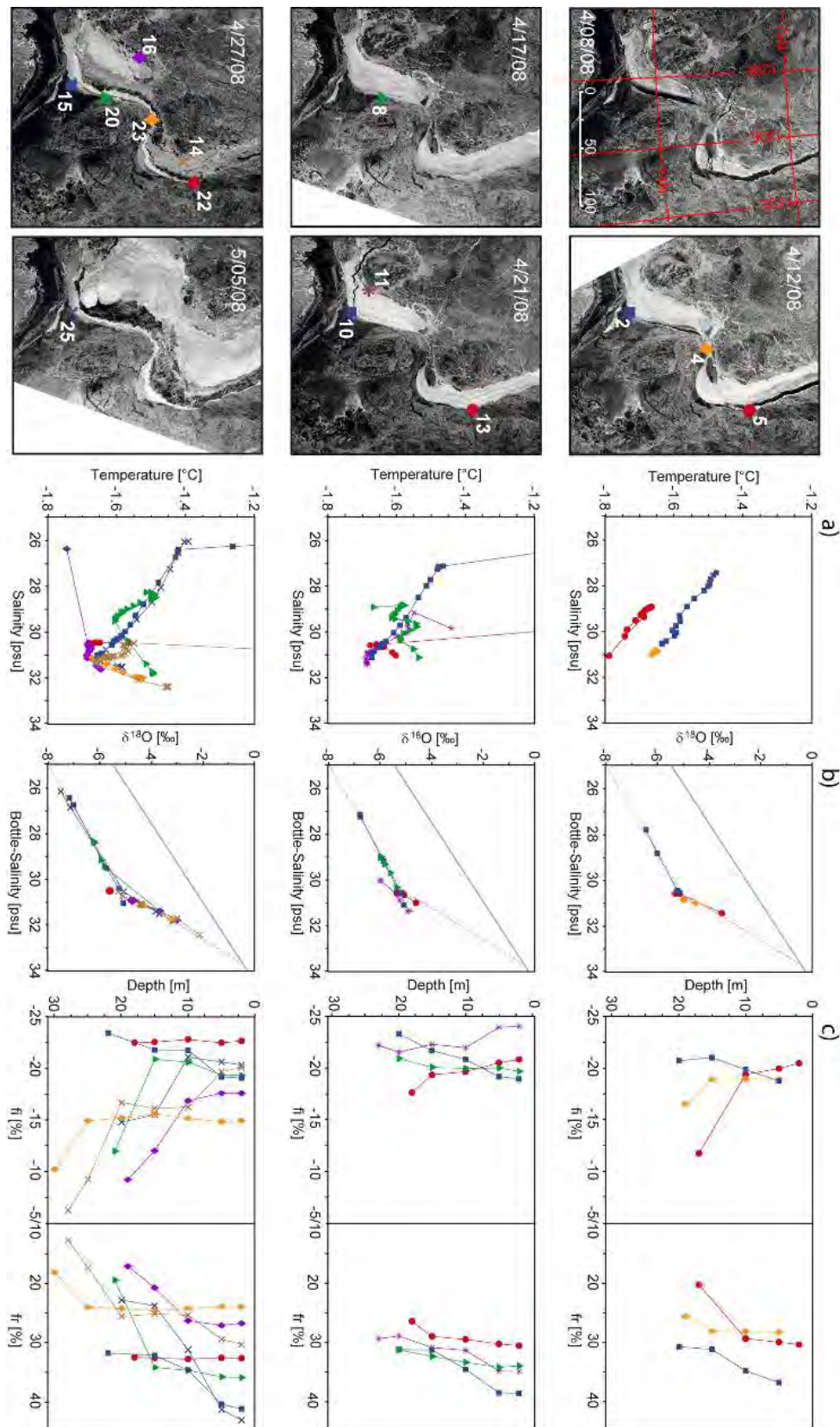


Abb. 1: Zeitlich gegliederte Stationsdaten von TRANSDRIFT XIII vom Rand der Polynja in der südöstlichen Laptev-See im Spätwinter 2008. Neben den Satellitenbildern mit der Lage der jeweils abgebildeten Stationen sind im Panel (a) Temperaturdaten gegen Salzgehalte dargestellt, im Panel (b) $\delta^{18}\text{O}$ gegen Salzgehalte und im Panel (c) die berechneten Anteile von Flusswasser und Meereisschmelzwasser. Die obere Reihe zeigt Stationen vom 11. bis 14. April, die mittlere vom 16. bis 21. April und die untere vom 21. April bis 5. Mai 2008.

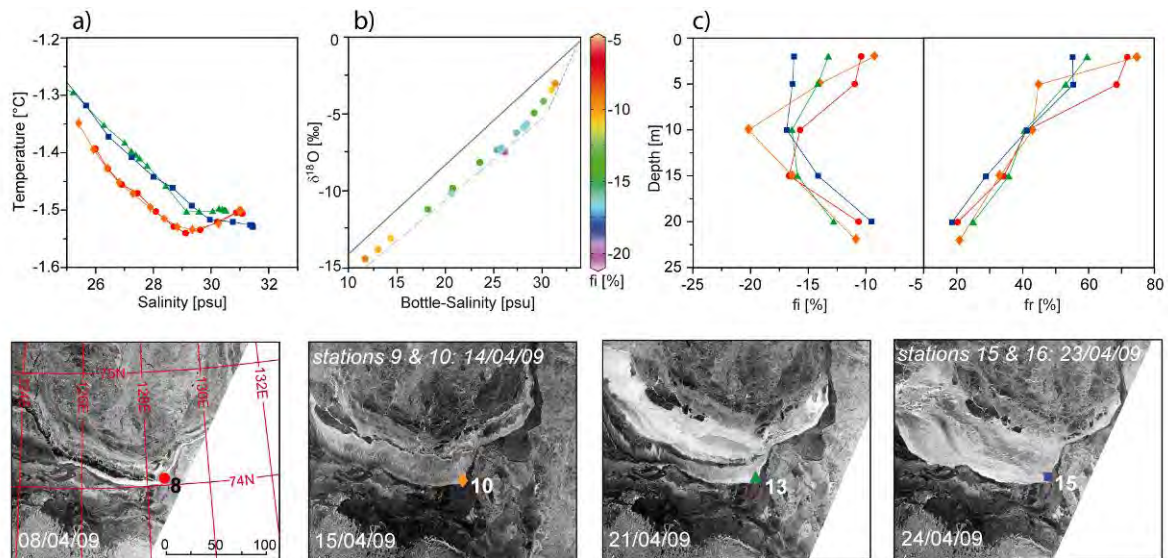


Abb. 2: Stationsdaten von TRANSDRIFT XV im April 2009. Die Satellitenbilder zeigen die Lage der abgebildeten Stationen relativ zur Polynja. Dargestellt sind a) Temperaturdaten gegen Salzgehalte und b) $\delta^{18}\text{O}$ gegen Salzgehalte sowie c) basierend auf $\delta^{18}\text{O}$ /Salzgehalts-Massenbilanzen berechnete Anteile von Flusswasser und Meer-eisschmelzwasser.

Der Winter-Datensatz zeigt die zeitliche Entwicklung der Wassereigenschaften während des Verlaufs der Polynja-Aktivität im April/Anfang Mai 2008 und April/Anfang Mai 2009 und ermöglicht es, ein prinzipielles Schema für die Modifikation der Wassersäule zu erstellen. Die schwache Wasserstratifikation auf dem Schelf im vorangegangenen Sommer erleichterte die turbulente Mischung der Wassersäule und führte zu homogenen Konzentrationsprofilen mit gemittelten Werten (Abb. 3a). Dies wurde im April/Anfang Mai 2008 beobachtet. Die konvektive Mischung der oberen Wassersäule während der Meereisbildung führte zur schrittweisen Erhöhung der Salzgehalte (Abb. 3b) bis zu Werten des bodennahen Wassers, die über der Verlauf der Polynja-Aktivität unverändert blieben. Dies wurde April/Anfang Mai 2009 bis zu mittleren Wassertiefen in einer Zeitserie beobachtet (vgl. Abb. 2). Bei überwiegend advektivem Wassermasseneinstrom während einer Polynjaöffnung wird das saline Bodenwasser schrittweise durch salzärmeres Wasser vermutlich aus anderen Polynja-Regionen ersetzt (Abb. 3c). Dieser Prozess war April/Anfang Mai 2009 dominant.

Trotz des sehr unterschiedlichen Einflusses der Polynja-Aktivität auf die Hydrographie im April/Anfang Mai 2008 und 2009 sind die Gesamtbudgets der Meereisbildung in der Polynja-Region kaum unterschiedlich. Dies zeigt, dass es vor allem die unterschiedlichen Vorbedingungen der Sommerhydrographie und der Flusswasserausbreitung sind, die im darauffolgenden Winter die Auswirkungen der Polynja auf die Bodenwassermodifikation bestimmen.

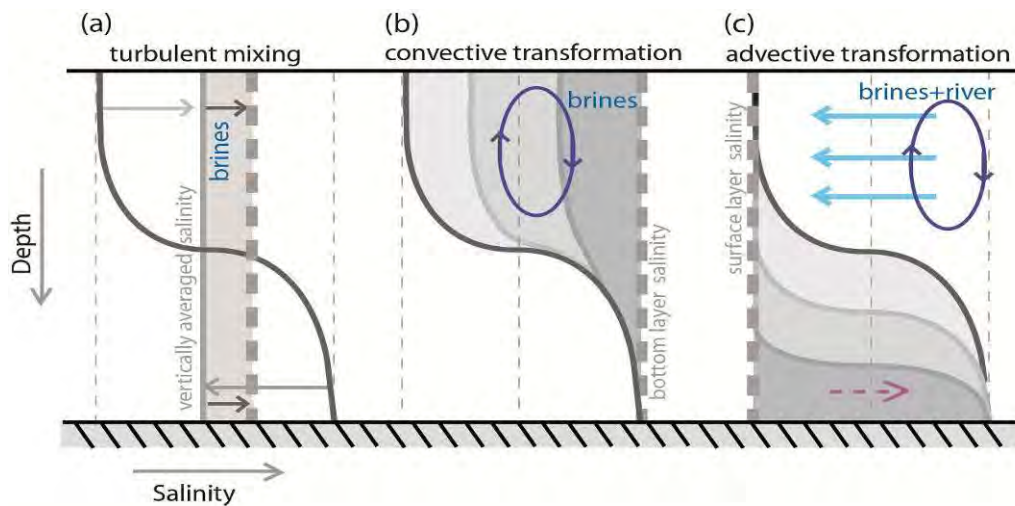


Abb. 3: Die Transformation eines typischen Salinitätsprofils der Wassersäule (dunkelgrau) zu durchmischten, konstanten Wassereigenschaften (dicke gestrichelte Linie) während der Polynja-Aktivität in der Laptev-See.

Sommerbeobachtungen: Süßwasserbilanzen in aufeinanderfolgenden Jahren

Für vier Sommer-Datensätze (1994 und 2007-2009; Abb. 4) wurden auf der Grundlage von $\delta^{18}\text{O}$ -basierten Massenbilanzen (z. B. Bauch et al., 2009) Budgets für die Flusswasser-, Meereisschmelz- und Meereisbildungskomponente berechnet.

Der gesamte Süßwassergehalt in der Laptev-See variiert sehr stark zwischen den Jahren (Abb. 5), da die starken zwischenjährlichen Schwankungen des Flusswassereintrags durch die Eisschmelze verstärkt werden. Denn nur in Jahren mit höheren Flusswasserbudgets sind signifikante Meereis-Schmelzwasserbudgets vorhanden und erhöhen den gesamten Süßwassergehalt entsprechend. Das negative Meereis-Schmelzwasserbudget (Süßwasserdefizit durch Meereisbildung) bleibt dagegen fast unverändert zwischen den Jahren.

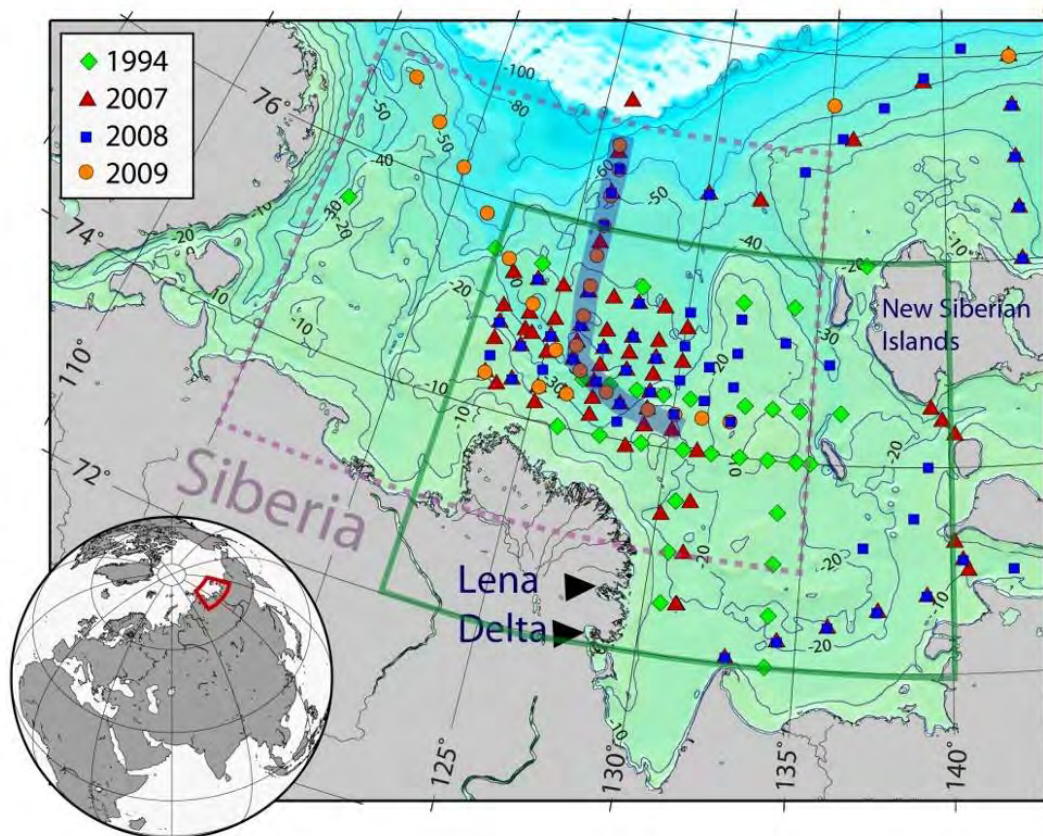


Abb. 4: Geographische Verteilung der Stationen in den Sommern 1994 und 2007-2009. Die Hauptaustromarme der Lena sind durch schwarze Dreiecke markiert. Die Regionen für die Berechnung der Budgets (grüne Box) und der Meereis-Konzentrationen (gestrichelte Box) sind markiert.

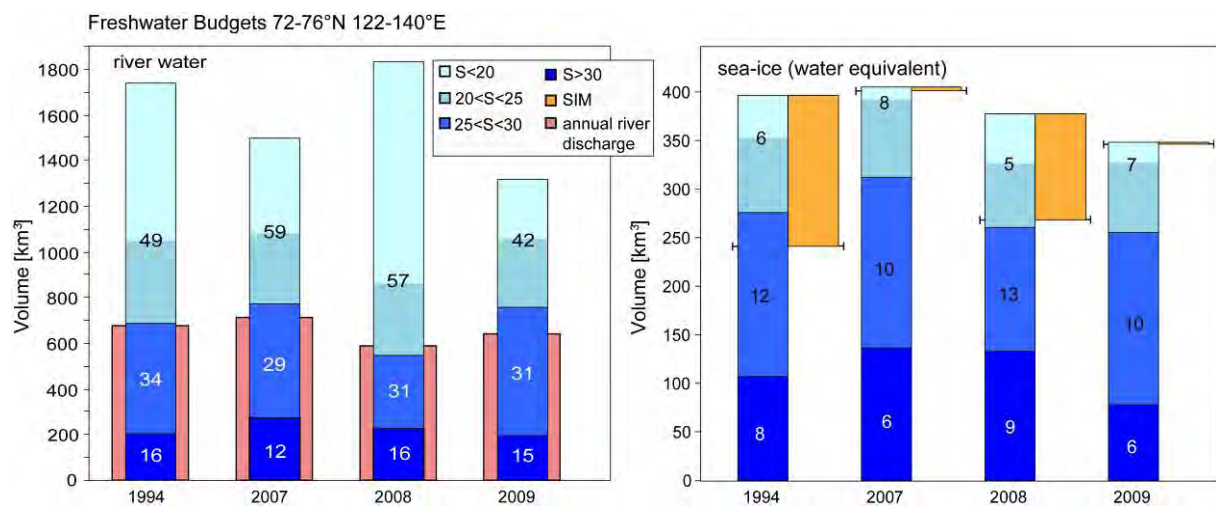


Abb. 5: Die Budgets der Flusswasser (links) und Schmelzwasser (rechts) in der östlichen Laptev-See zwischen 72-76°N und 122-140°E. Die absoluten Volumen (Balkenplot) und der prozentuelle Anteil (Zahlen innerhalb der Balken) des Flusswassers und des negativen Schmelzwassers (Meereisbildung) sind in vier Salinitätsschichten gezeigt. Die rosa Balken zeigen die jährlichen Flusswassermengen der Lena. Der positive Meereis-Schmelzwasseranteil tritt nur im Oberflächenbereich auf und ist parallel als gelber Balken gezeigt.

Die Budgets der Süßwasserkomponenten mit separat integrierten negativen und positiven Schmelzwasseranteilen wurden für die östliche Laptev-See berechnet (Abb. 5; s. Abb. 4 für Verteilung der Stationen). Flusswasser-Budgets schwanken zwischen 1.300 km³ im Jahre 2009 und 1.700 km³ 1994 und weisen durch den Vergleich mit dem jährlichen Flusswassereintrag darauf hin, dass die Residenzzeit der Wassermassen auf dem Schelf zwei bis drei Jahre beträgt. Das negative Schmelzwasserbudget (das Wasseräquivalent von der in der Laptev-See abgebildeten Meereismenge) hingegen bleibt fast unverändert zwischen den Jahren. Der positive Anteil des Meereis-Schmelzwassers befindet sich nur in der oberen Wassersäule (meistens obere 5 m) und tritt nur in Jahren mit nördlicher Flusswasserverteilung und hohen Flusswasserwerten in der zentralen Laptev-See auf. Dieser positive Anteil des Meereis-Schmelzwasserbudgets reduziert das gesamte Meereisbildungsbudget in den Jahren 1994 und 2008. Das gesamte Süßwasserbudget zeigt sehr starke Variabilität aufgrund der Variationen in der Flusswasserverteilung auf dem Schelf (s. rote Balken in Abb. 5a) und ist noch durch die Schmelzwasseranteile (gelbe Balken in Abb. 5b) erhöht, welche nur in Jahren auftreten, in denen auch das Flusswasserbudget hoch ist.

Sommerbeobachtungen: Einfluss des Flusswassers in der östlichen Laptev-See auf lokale Meereisschmelzen

Vier Sommer-Datensätze (1994 und 2007-2009; s. Abb. 4) mit unterschiedlichen Flusswasserverteilungen zeigen, dass Flusswassermenge und Flusswasserverteilung eine entscheidende Rolle in der saisonalen Eisschmelze spielen (Bauch et al., in press). Dies ist überraschend, da der Rückgang und die Ausdehnung der sommerlichen Eisdecke nicht durch das Flusswasser beeinflusst und von anderen Faktoren kontrolliert werden (Bareiss et al., 1999).

Im Oberflächenwasser, besonders auf dem inneren Laptev-See-Schelf, korrelieren in erster Näherung die Meereis-Schmelzwasseranteile (f_i) mit den Flusswasseranteilen (f_r) (Abb. 6). Die Werte der Flusswasseranteile schwanken stark, da die Verteilung des Flusswasserausstroms im Sommer durch regionale Windmuster kontrolliert wird (Bauch et al., 2011). Der Wärmegehalt des Flusswassers selbst ist zu klein, um die Meereseisbedeckung zu schmelzen, aber Schwebstoff und CDOM (Colored Dissolved Organic Matter) aus dem Fluss fördern die Lichtabsorption an der Oberfläche und ermöglichen somit eine verstärkte Eisschmelze.

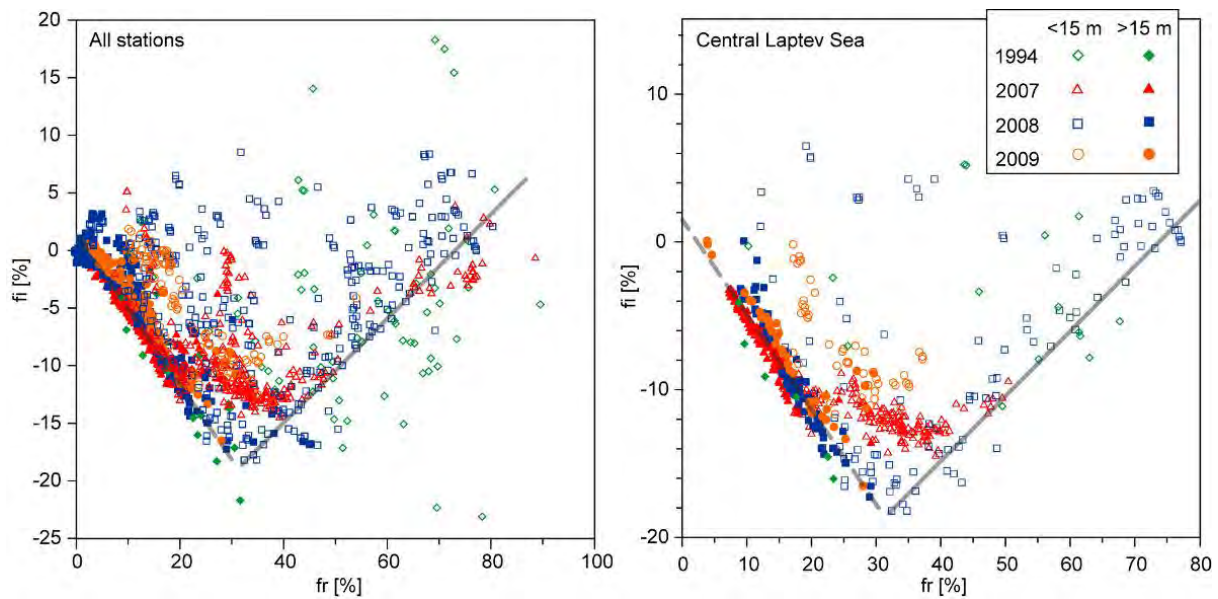


Abb. 6: Flusswasseranteile (fr) gegen Meereis-Schmelzwasseranteile (fi) in der Laptev-See für verschiedene Jahre. Die in den jeweiligen Jahren unterschiedliche Flusswasser-Verbreitung zeigt sich in niedrigen Flusswasseranteilen 2007 und 2009 und relativ hohen Flusswasseranteilen 1994 und 2008 in der zentralen Laptev-See (nördlich des Lena-Delta). Die durchgezogene Linie zeigt die Zunahme der Meereis-Schmelzwasseranteile (fi) mit zunehmenden Flusswasseranteilen (fr) in der oberflächennahen Schicht (flacher als 15 m); die gestrichelte Linie zeigt die entgegengesetzte Korrelation für die bodennahe Schicht (tiefer als 15 m).

Gleichzeitig verhindert die Trübe des Flusswassers das Eindringen der Strahlung in die tiefer liegenden Wasserschichten. Daher wird der weitere Anstieg des Wärmegehalts durch Sonneneinstrahlung wiederum durch das Flusswasser begrenzt (Hill, 2008). So können Jahre mit niedrigen Flusswasseranteilen und langer Sonneneinstrahlungsdauer relativ hohe Wärmegehalte aufweisen (vgl. Abb. 7 und Abb. 8, Daten von 2007 und 2009 mit niedrigen Flusswasseranteilen in der zentralen Laptev-See und frühem Öffnen der Meereisdecke 2007 im Vergleich zu 2009), während in Jahren mit hohem Flusswassergehalt eine längere Sonneneinstrahlungsdauer (vgl. Abb. 7 und Abb. 8, Daten von 2008 und 1994 mit hohen Flusswasseranteilen und spätem Öffnen der Meereisdecke 2008 im Vergleich zu 1994) keinen verstärkten Effekt auf den Wärmegehalt des Oberflächenwassers hat.

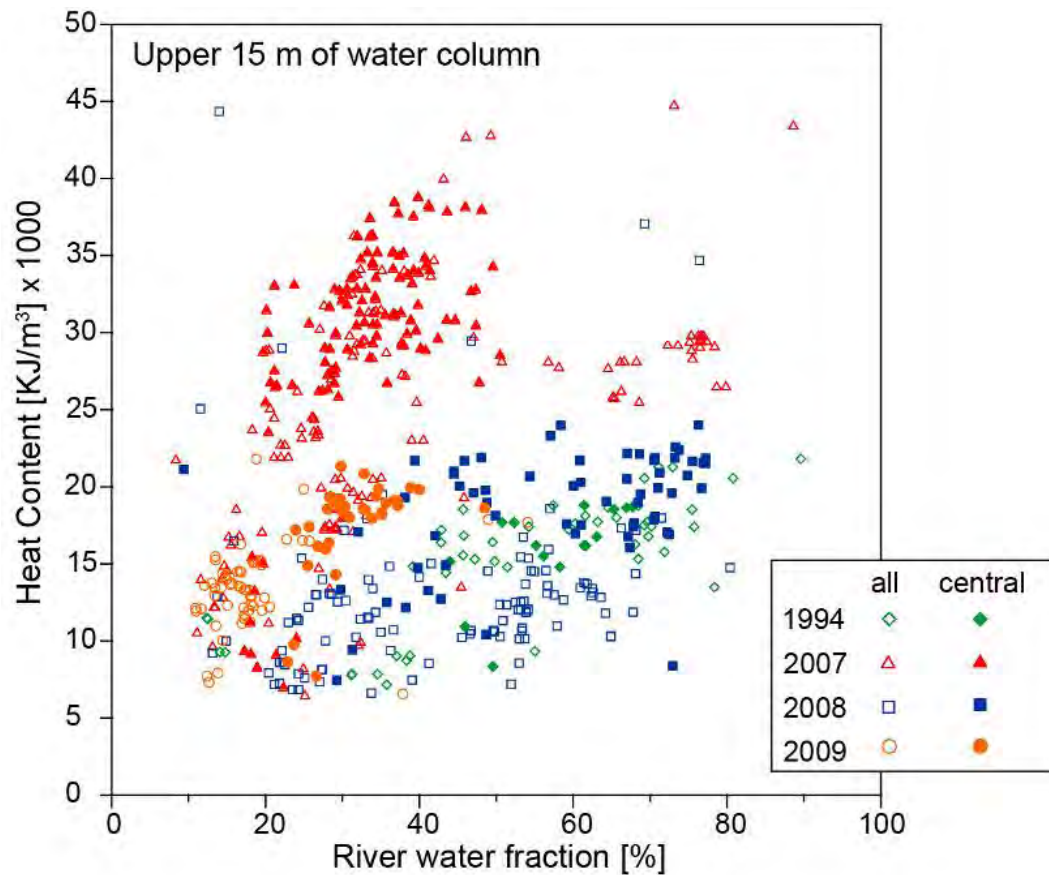


Abb. 7: Flusswasseranteil gegen Wärmegehalt im Oberflächenwasser der Laptev-See für unterschiedliche Jahre. In allen Jahren zeigt sich eine Korrelation zwischen Flusswasseranteil und Wärmegehalt. Die Korrelation ist besonders ausgeprägt in den Jahren 1994 und 2008 mit relativ hohen Flusswasseranteilen in der zentralen Laptev-See, jedoch sind die Absolutwerte des Wärmegehalts insgesamt relativ niedrig. In den Jahren mit relativ niedrigen Flusswasseranteilen (2007 und 2009) hängen die Absolutwerte mit der Dauer der Sonneneinstrahlung zusammen und sind mit einem frühen Aufbruch der Meereisdecke im Sommer 2007 relativ hoch.

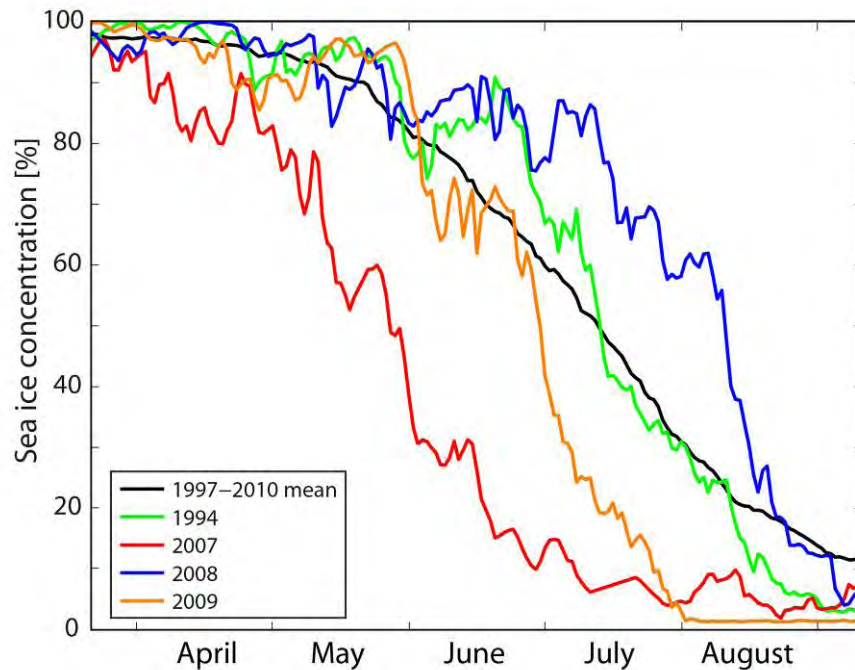


Abb. 8: Zeitlicher Verlauf der Meereisbedeckung für die untersuchten Jahre in der zentralen Laptev-See (115-135°E, 73-77°N; satellitenbasierte Daten des National Snow and Ice Data Center; weitere Details siehe Bauch et al., in press). Die potentielle Dauer der Sonneneinstrahlung wird durch die Öffnung der Meereisdecke angenähert. Die saisonale Abnahme der Meereisbedeckung in den Jahren 1994 und 2009 ist ähnlich der mittleren Abnahme (1997-2010), während die Meereisbedeckung 2007 früher und 2008 später stattfindet und somit die Dauer der Sonneneinstrahlung potentiell relativ lang bzw. kurz ist.

Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisse

Klimamodelle prognostizieren tiefgreifende Umweltveränderungen für die polaren Gebiete, welche langfristig gravierende Auswirkung auf potentielle Märkte haben werden. Die Ergebnisse des Teilprojektes liefern wichtige Basisdaten, die zum einen das Verständnis der klimarelevanten Prozesse im Arbeitsgebiet verbessern und zum anderen die Implementierung dieser Prozesse in Klimamodelle mit prognostischen Kapazitäten ermöglichen. Die z. T. multisaisonalen Zeitreihen der Datensätze erlauben zudem, die Ergebnisse der Modelle (z. B. Eisproduktion) anhand konkreter Daten zu überprüfen, und tragen zur stetigen Verbesserung der Modelle bei. Unter Berücksichtigung der besonderen Bedeutung der Arktis für das Klimasystem und seiner raschen Veränderlichkeit ergibt sich für die Nutzung der Modelldaten eine weite Palette von Anwendungen. Grundsätzlich schaffen die Ergebnisse der Modelle die wissenschaftliche Grundlage für weitreichende Planungsentscheidungen von Wirtschaft und Politik. Betroffene Bereiche sind dabei insbesondere der Klima- und Umweltschutz, die Gewinnung von Rohstoffen und Nahrungsmitteln und die Nutzung von Verkehrswegen. Die

grundsätzliche Bedeutung von Klimaveränderungen auf globaler und regionaler Ebene ist im Report des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) detailliert dargelegt.

Die Datensätze aus den Isotopenmessungen werden bzw. sind in Datenbanken archiviert (PANGAEA und GISS-O-18-Datenbank) und stehen somit für eine weitere Nutzung zur Verfügung. Die wissenschaftlichen Ergebnisse sind bzw. werden in Fachschriften (ISI-gelistet) veröffentlicht und werden auf internationalen Tagungen präsentiert.

Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Es sind keine relevanten Ergebnisse auf dem Gebiet bei anderen Stellen bekannt geworden.

TP 4: Änderungen von systemsteuernden Prozessen und AbläufenEingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse

Austauschprozesse, Eisbildungsraten und die Dynamik der Polynjen bezüglich Wachstum und Verteilung von dünnem Eis und Festeis wurden mit unterschiedlichen Ansätzen für den Zeitraum des rezenten Klimawandels der letzten dreißig Jahre analysiert: Atmosphärische Modellierung, gekoppelte Atmosphären/Meereis/Ozean-Modellierung und Satellitenfernerkundung. Mit In-Situ-Messungen während der Winterexpedition TRANSDRIFT XX wurden weitere Validationsdatensätze für die Modellierung und Fernerkundung erhoben. Für die Laptev-See ist ein integrierter Ansatz zur Abschätzung der Eisproduktion in Zusammenarbeit mit den anderen Teilprojekten entwickelt worden. Die Modellstudien wurden im Zusammenhang mit den Erkenntnissen aus Prozessanalysen dazu verwendet, die Rolle von Polynjen in der russischen Arktis im sich verändernden Klima abzuschätzen.

Fernerkundung (AP1)

Algorithmus zur Bestimmung von dünnem Eis in Polynjen

Die sibirische Laptev-See ist die wichtigste Eisproduktionsregion der Arktis. Von großer Bedeutung ist daher die Bestimmung der Eisproduktionsraten in den Polynjen. Entscheidende Variablen sind hier die Verteilung und Dicke des dünnen Eises. Yu und Lindsay (2003) haben einen Algorithmus zur Bestimmung von Dünneisdicken in Polynjen entwickelt. Basierend auf Eisoberflächentemperaturen in Kombination mit atmosphärischen Daten wird die Eisdicke von 0 bis 0,5 m mit einem Energiebilanzmodell bestimmt. Der Algorithmus wurde in der abgeschlossenen Projektphase modifiziert und verbessert (Adams et al., 2012). Es wurden angepasst:

- die Berechnung der turbulenten Wärmeflüsse (Verwendung eines iterativen Schemas nach Launiainen & Vihma, 1990);
- die Berechnung des atmosphärischen Emissionskoeffizienten, der für die Berechnung der langwelligen Strahlungsbilanz benötigt wird (Verwendung des Parametrisierungsschemas nach Jin et al., 2006);
- Annahme einer Eisschicht ohne Schneeeauflage (Verwendung der Konduktivität von reinem Eis).

Für das Energiebilanzmodell werden als Eingabedaten die Oberflächentemperatur, die 2-m-Lufttemperatur und -feuchte sowie die Windgeschwindigkeit benötigt. Die Eisoberflächentemperaturen werden aus Strahlungstemperaturen des Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) mit 1 km räumlicher Auflösung abgeleitet (Hall et al., 2004, 2007). Als atmosphärische Daten werden Daten des Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP-II) Reanalysis 2 der US National Centers for Environmental Prediction (NCEP)/Department of Energy (DOE) (Kanamitsu et al., 2002), Global-Model-Extended (GME)-Analysen des Deutschen Wetterdienstes (Majewski et al., 2002) und COSMO-Daten des Arbeitspakets Modellierung verwendet. Da für das Energiebilanzmodell keine Berechnung der kurzwelligen Strahlungsflüsse möglich ist, werden nur MODIS-Nachtszenen verwendet. Am Beispiel des Wärmetransferkoeffizienten (CH, s. Abb. 1) zeigt sich, dass die Annahme eines konstanten Wertes wie beim Algorithmus von Yu und Lindsay (2003) nicht realitätsnah ist. In der neu implementierten Methode wird der Wärmetransferkoeffizient iterativ für die jeweils herrschenden Stabilitätsbedingungen berechnet.

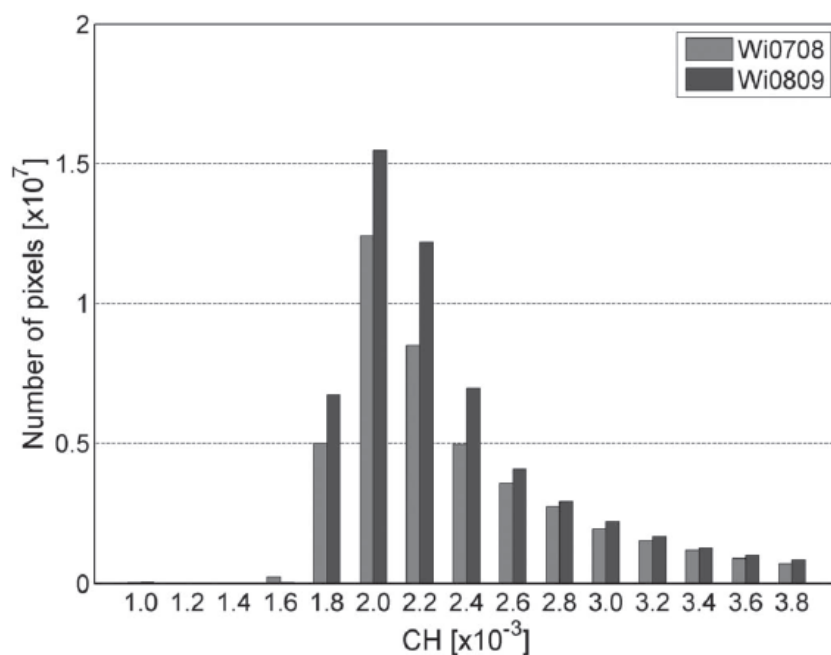


Abb. 1: Verteilung der im iterativen Verfahren ermittelten Wärmetransferkoeffizienten (CH) für die Wintermonate 2007/2008 (hellgrau) und 2008/2009 (dunkelgrau) nach Adams et al. (2012).

Zur Verifikation der MODIS-Dünneisdicken mit anderen Fernerkundungsdaten wurden Environmental Satellite (ENVISAT) Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR) mit einer räumlichen Auflösung von 150 x 150 m² herangezogen. Abbildung 2 zeigt einen Vergleich von MODIS-Daten und ENVISAT-ASAR für den 3.1.2009. Die Form der Polynja bei beiden

Datensätzen stimmt überein. Die Eisdickenzunahme von der Festeiskante zum Packeis, die in den ENVISAT-ASAR-Daten durch ansteigende Rückstreukoeffizienten angegeben ist, wird in den MODIS-Dünneisdicken (hier berechnet aus MODIS-Eisoberflächentemperaturen und NCEP-Reanalysen) übereinstimmend wiedergegeben.

Statistische Fehlerabschätzung der MODIS-Dünneisdicken

Zur statistischen Bestimmung der Unsicherheiten in den berechneten Eisdicken wurde eine Monte-Carlo-Fehlerabschätzung durchgeführt. Die Fehler der Eingangsvariablen MODIS-Eisoberflächentemperatur, 2-m-Lufttemperatur und -feuchte sowie 10-m-Windgeschwindigkeit werden auf Basis von Verifikationsstudien innerhalb des Projekts (Ernsdorf et al., 2011) und weiteren Studien (Hall et al., 2004; Renfrew et al., 2002) bestimmt (Tab. 1). Die Monte-Carlo-Fehlerabschätzung wird für MODIS-Eisoberflächentemperaturen und atmosphärische Variablen aus NCEP-Daten durchgeführt. Zur Berechnung der Dünneisdicken werden die Eingangsvariablen an jedem MODIS-Pixel 100 Mal zufällig im Fehlerbereich der Variablen variiert. Dieses Verfahren wird auf insgesamt 2401 MODIS-Szenen des Winters 2007/08 und 2241 MODIS-Szenen des Winters 2008/09 angewendet. Nebenbedingungen sind, dass der totale atmosphärische Energiefluss (Strahlungsbilanz minus turbulente Wärmeflüsse) negativ sein muss und die turbulenten Wärmeflüsse zur Atmosphäre gerichtet sind. Aufgrund dieser Restriktionen kann es vorkommen, dass weniger als 100 Varianten pro Pixel berechnet werden. Im Durchschnitt werden 89 Varianten für jedes Dünneis-Pixel berechnet, die dann in die Bestimmung der Fehler eingehen.

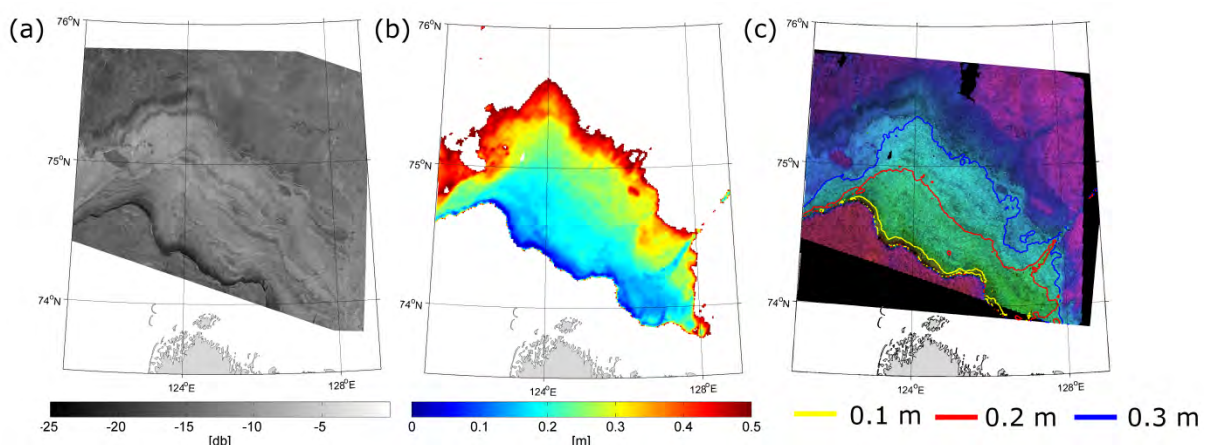


Abb. 2: Vergleich zwischen MODIS-Daten vom 3.1.2009 1:35 UTC und ENVISAT-ASAR-Rückstreukoeffizienten vom 3.1.2009 2:43 UTC: a) ENVISAT-ASAR-Aufnahme, b) MODIS-Dünneisdickenverteilung berechnet mit MODIS-Oberflächentemperaturen und NCEP-Reanalysen, c) Komposit aus MODIS-Oberflächentemperaturen und ENVISAT-ASAR-Rückstreukoeffizienten. Konturlinien zeigen die MODIS-Eisdicken von 0,1, 0,2 und 0,3 m.

Tab. 1: Fehler der Eingangsvariablen bei der Bestimmung der Dünneisdicke (MODIS nach Hall et al., 2004, NCEP nach Ernsdorf et al., 2011, und Renfrew et al., 2002)

	MODIS	NCEP
Eisoberflächentemperatur (°C)	±1.6	
2-m-Lufttemperatur (°C)		±4.5
10-m-Windgeschwindigkeit (m/s)		±1.3
Relative Luftfeuchte (%)		±20

Tabelle 2 zeigt den statischen Fehler für verschiedene Eisklassen und Datenkombinationen für die Winter 2007/08 und 2008/09. Es ist ersichtlich, dass der absolute Fehler für alle Datenkombinationen mit größerer Eisdicke zunimmt. Insgesamt ergibt sich, dass der Fehler bei Eisdicken im Bereich 0 bis 20 cm mit ±4.7 cm hinnehmbar ist, wohingegen eine Eisdickenbestimmung bis 50 cm für eine operationelle Verwendung einen zu großen Fehler aufweist.

Tab. 2: Statischer Fehler der Dünneisdicke (thin ice thickness, TIT), der sich aus der Monte-Carlo-Fehlerabschätzung für verschiedene Eisklassen für den Winter 2007/08 und 2008/09 ergibt (Adams et al., 2012)

	Winter 2007/08	Winter 2008/09	Mittel beider Winter
Eisklasse (m)	TIT_{MODIS+NCEP} (cm)	TIT_{MODIS+NCEP} (cm)	TIT_{MODIS+NCEP} (cm)
0.00-0.05	±1.0	±1.0	±1.0
0.05-0.10	±2.0	±2.2	±2.1
0.10-0.20	±5.2	±5.3	±5.3
0.20-0.30	±16.8	±12.0	±14.4
0.30-0.40	±34.2	±28.4	±31.3
0.40-0.50	±36.7	±60.2	±48.5
gemittelt bis 0.2	±4.7	±4.6	±4.7
gemittelt bis 0.5	±26.1	±36.0	±31.1

Die Analyse zu den Anteilen der Einzelfehler (Abb. 3) zeigt, dass die Unsicherheiten bei größeren Eisdicken (20-30 cm) deutlich zunehmen und dass vor allem die Fehler in der 2-m-Temperatur für die Unsicherheiten in den bestimmten Eisdicken verantwortlich sind (Adams et al., 2012). Insbesondere eine Unterschätzung der Lufttemperatur führt demnach zu einer deutlichen Überschätzung der Polynjafläche mit Eisdicken im Bereich von 20 bis 30 cm. Hingegen haben Fehler in der relativen Feuchte und der Windgeschwindigkeit nur einen geringen Einfluss auf die Genauigkeit der abgeleiteten Eisdicken und damit auf die Größe der identifizierten Polynja.

Tägliches Komposit von Dünneisdicken für die Winter 2007/08 und 2008/09

Ein tägliches Komposit von Dünneisdicken von 0 bis 0,3 m wurde für die beiden Winter 2007/08 und 2008/09 erstellt. Dazu werden alle verfügbaren MODIS-Nachtszenen verwendet. Die atmosphärischen Variablen stammen aus NCEP-Reanalysen. Die Verifizierung des Dünneisproduktes zeigt in einigen Fällen zu große Polynjen bedingt durch a) zu hohe MODIS-Oberflächentemperatur (durch Fehler in der MODIS-Wolkenmaske oder durch die Beeinflussung der Oberflächentemperatur durch Warmluftadvektion von der angrenzenden Polynja) und b) zu niedrige NCEP-2-m-Lufttemperaturen. Es wird daher eine Korrektur der einzelnen MODIS-Dünneiskarten anhand von MODIS-Eisoberflächentemperaturen durchgeführt (Abb. 4). Ähnlich der Bestimmung von MODIS-Meereiskonzentrationen, die in Drüe und Heine-mann (2004) beschrieben wird, wird eine Hintergrundtemperatur in einem 200x200 Pixel großen Fenster berechnet und die Anomalie zu jedem Eisoberflächentemperatur-Pixel bestimmt. Ist die Anomalie-Temperatur geringer als ein fest vordefinierter Anomalie-Grenzwert, wird dieser Pixel als dickes Eis klassifiziert und bei der weiteren Berechnung nicht mehr miteinbezogen.

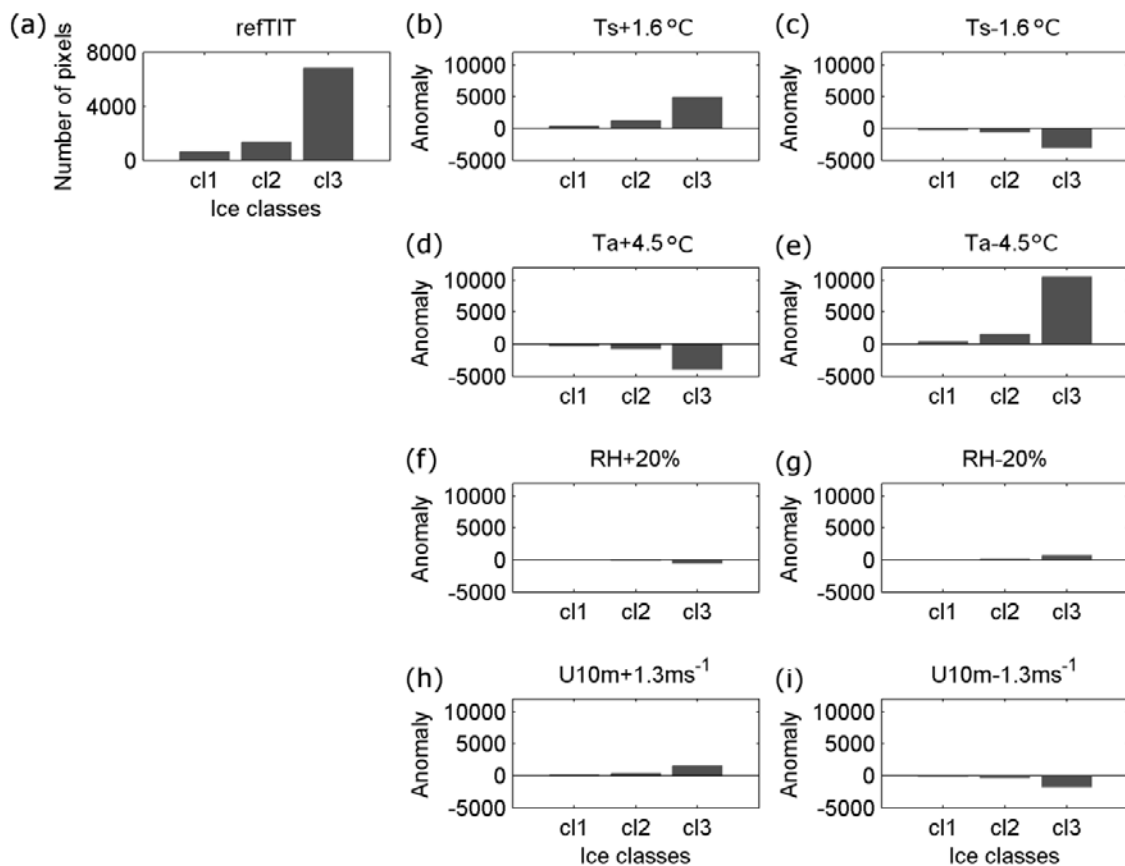


Abb. 3: a) Mittlere Summe der Referenz-Dünneis-Pixel für die Dickenklassen cl1 (0-5 cm), cl2 (5-10 cm) und cl3 (10-20 cm), b) bis i) Anomalie zur Referenz-Eisdicke für einzelne Eingabevariablen und deren maximale Unsicherheiten.

Das tägliche Komposit wird unter Verwendung des Medians gebildet, wobei alle Pixel mit Eisdicken kleiner gleich 0,3 m berücksichtigt werden. Das tägliche Komposit von Dünneisdecken besteht aus allen verfügbaren MODIS-Szenen pro Tag, durchschnittlich 15 Szenen. Aufgrund von Wolkenbedeckung, nicht vollständiger Abdeckung der Laptev-See und der Variabilität der Polynja-Größe während eines Tages variiert die Anzahl der verwendbaren MODIS-Überflüge pro Pixel zwischen 1 und 18 (in der Polarnacht ist die Häufigkeit am größten). Das finale Produkt ist von November 2007 bis April 2008 und für dieselben Monate 2008/09 verfügbar. Das Produkt enthält Eisdicken von 0 bis 0,2 cm und eine Eisdicken-Klasse für die Eisdicken von 0,2 bis 0,3 cm (Abb. 4). Für die beiden Winter deckt das tägliche Produkt durchschnittlich 59% der gesamten Laptev-See und 67% der Laptev-Polynjen ab.

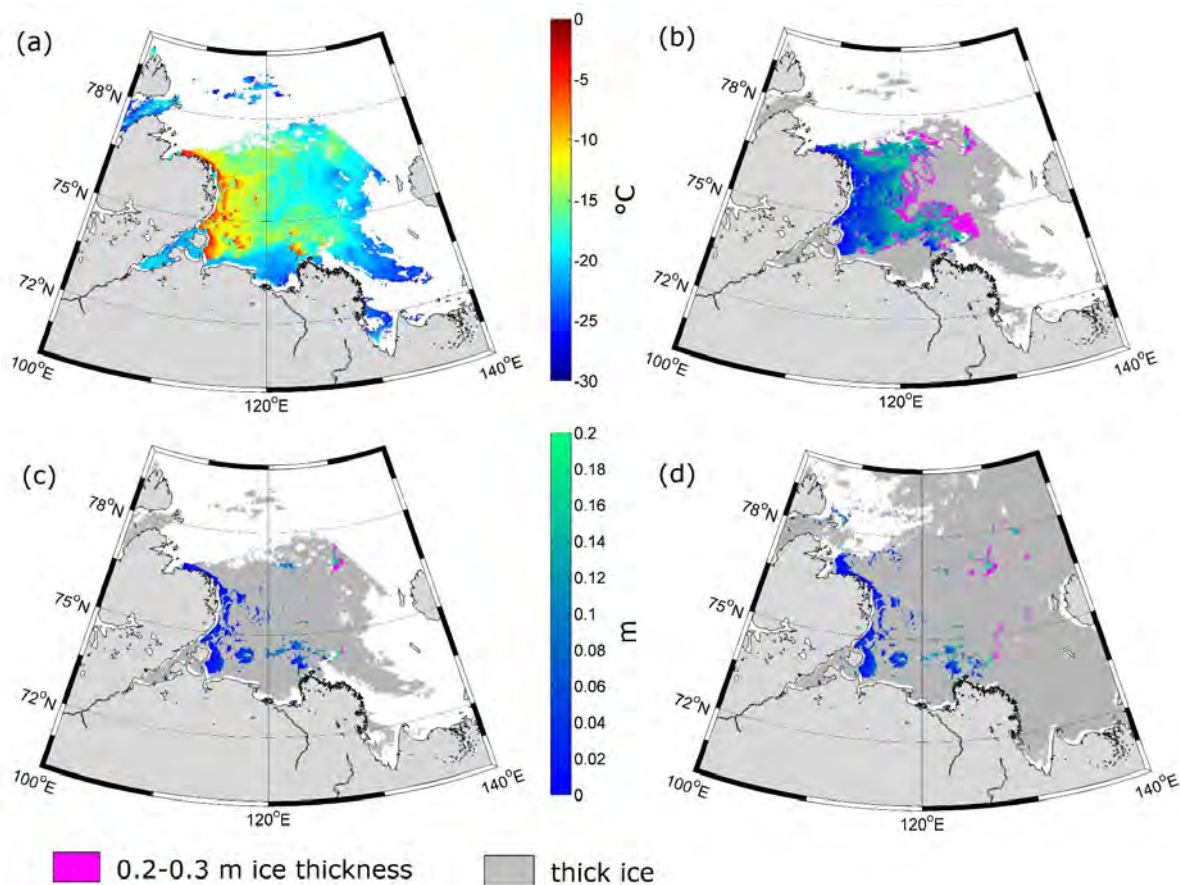


Abb. 4: Beispiel für die Filterung der Dünneisdicken mit einem Eisoberflächentemperatur-Anomalie-Grenzwert vom 13.01.2009 20:25 UTC und Tageskomposit für den 13.01.2009; a) MODIS-Eisoberflächentemperaturen für die Einzelszene; b) Eisdickenverteilung ohne Korrektur für die Einzelszene; c) Eisdickenverteilung mit Anomalie-Korrektur für die Einzelszene; d) Tageskomposit mit Anomalie-Korrektur.

Die Tageskompositis von Dünneisdicken können zur Verifikation anderer Dünneisprodukte, z. B. von modellsimulierten Dünneisdicken oder Eisdickenprodukte, die aus anderen Fernerkundungsdaten abgeleitet werden, verwendet werden. Eine andere Anwendung ist

die Assimilation des Produktes in das Meereis/Ozean-Modell FESOM (Arbeitspaket 2), um Dünneisverteilungen ohne Lücken zu generieren. Nachfolgend können diese Dünneisverteilungen, die die Laptev-See komplett abdecken, zur Berechnung von Eisproduktionsraten verwendet werden.

Festeis in der Laptev-See

Monatliche Komposits der Dünneisdicken dienen zur Bestimmung der Festeiskanten. Die Festeismasken für die Winter 2007/08 und 2008/09 (jeweils für die Monate November bis April) zeigt Abbildung 5. Für beide Winterhalbjahre zeigt sich eine ähnliche Form und Ausdehnung. Im Winter 2008/09 ist die Ausdehnung der Festeiskante im November größer als im Winter davor. Im ersten Winter wächst die Festeisfläche im März in einigen Teilen der Laptev-See nochmals stärker an, im April ist das Wachstum minimal. Im zweiten Winter hingegen breitet sich die Festeisfläche im April in einem Bereich der Laptev-See stärker aus.

Nach Fertigstellung der Festeiskanten für die letzten 10 Jahre (ab 2000/2001) wurde die Dynamik des Festeises genauer untersucht. Dabei zeigte sich, dass die Lage der maximalen Ausdehnung des Festeises im April sehr stabil ist. Jedoch ist eine zwischenjährige Variabilität der Ausdehnung in den einzelnen Monaten des Winters festzustellen, d. h. bis zu seiner maximalen Ausdehnung stabilisiert sich das Festeis unterschiedlich schnell in einzelnen Gebieten und verschiedenen Jahren (s. Rozman et al., submitted).

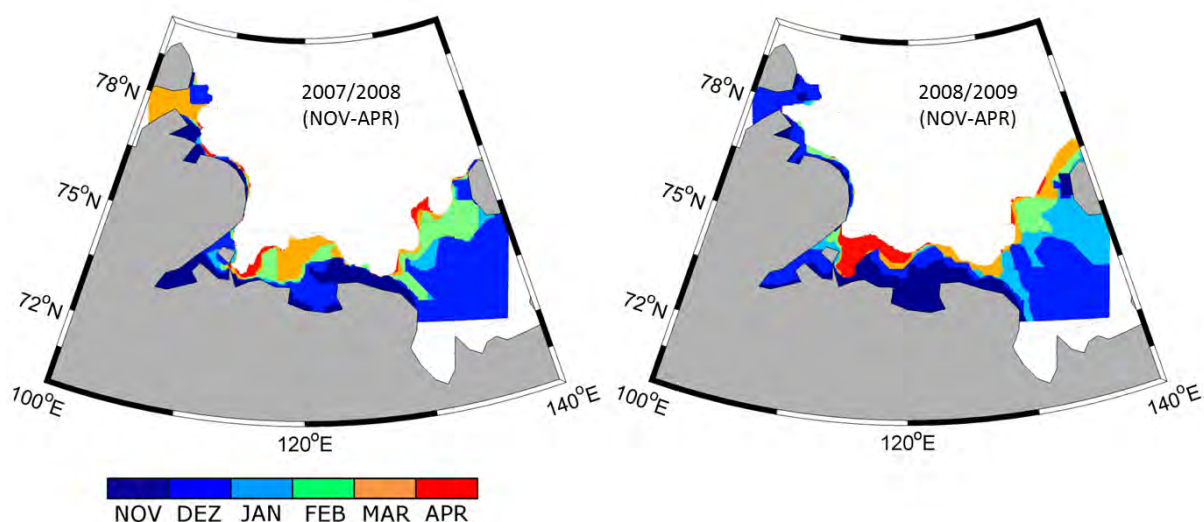


Abb. 5: Monatliche Festeismasken für die Laptev-See für die Winter 2007/08 und 2008/09.

Eisrinnen in der Laptev-See

Die Struktur und die Dynamik von Eisrinnen stellen eine wichtige Größe bei der Untersuchung der saisonalen Eisproduktion dar. Hierzu mussten zunächst geeignete Verfahren zur Segmentierung von Eisrinnen aus hochauflösenden ($1 \times 1 \text{ km}^2$) MODIS-Daten untersucht werden. Verschiedene histogrammbasierte Schwellenwertverfahren (*Otsu*, *iterative selection*, *min. error*, *max. entropy*, *min. fuzziness*) wurden hier für verschiedene Szenen getestet und mittels MODIS-Daten aus dem sichtbaren Spektralbereich validiert. Dabei hat sich gezeigt, dass eine iterative Suche nach dem *Otsu*-Verfahren im Durchschnitt über mehrere Szenen die besten und stabilsten Ergebnisse liefert (Abb. 6).

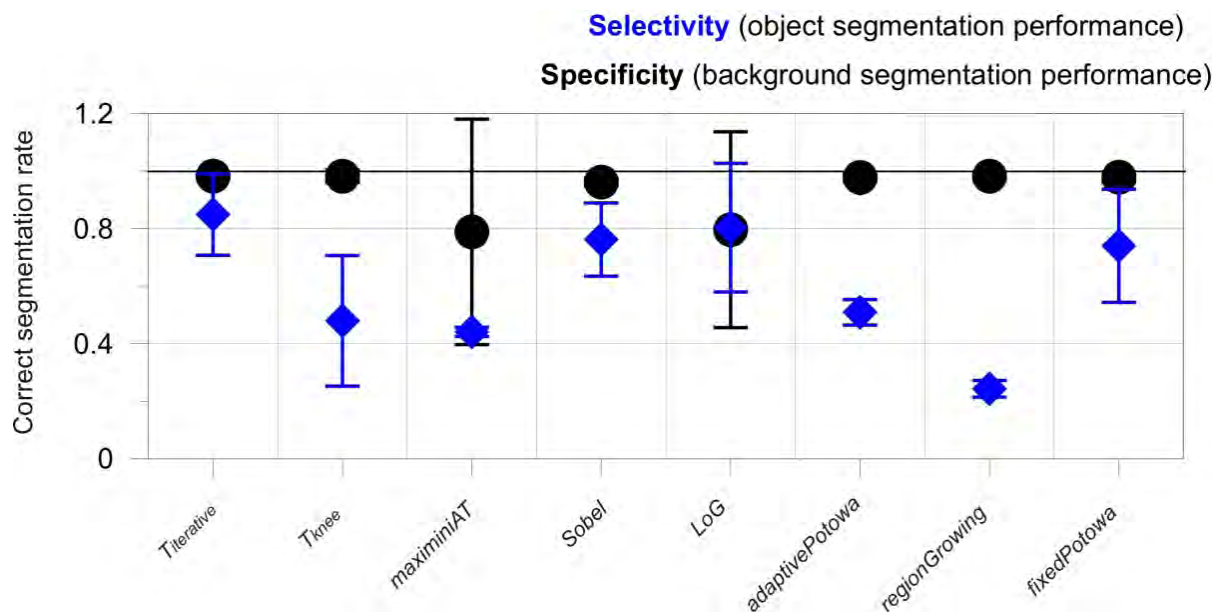


Abb. 6: Selektivität (blau, Performance der Objekterkennung) und Spezifität (schwarz, Performance der Hintergrunderkennung) für verschiedene Verfahren mit Standardabweichung für insgesamt 6 MODIS-Szenen.

Ein Problem ergibt sich jedoch durch die teilweise fehlerhafte MODIS-Wolkenmaske. So werden durch Wolken verursachte positive Temperaturanomalien nicht komplett ausmaskiert, wodurch bei der Segmentierung Artefakte entstehen, die eine weitere Filterung der Komposite der Eisrinnenverteilung notwendig machen. Dazu wurde ein Fuzzy-Ansatz gewählt, der über morphologische und zeitliche Merkmale einzelner Objekte und über die Definition gewichteter Regeln Artefakte erkennt und ausmaskiert. Durch diesen Schritt wird die Aussagekraft der verbleibenden Objekte deutlich erhöht, jedoch wird die räumliche Abdeckung mit Daten erheblich verringert (Abb. 7).

Die Einschränkungen der räumlichen Abdeckung durch die zusätzliche Filterung erschweren eine Verwendung von täglichen Kompositen. Dennoch eignet sich der implementierte

Ansatz sehr gut für eine Bestimmung der Auftrittsfrequenz von Eistrinnen im gesamten Arktischen Ozean, beispielsweise auf Monatsbasis (Abb. 8).

Die hochauflösenden MODIS-Eistrinnenkarten wurden verwendet, um innerhalb der Laptev-See die Rolle der Eistrinnen bei der saisonalen Eisproduktion im Vergleich zu den Polynjen abschätzen zu können. Die Ergebnisse zeigen, dass sich – wie zu erwarten – mit zunehmender räumlicher Auflösung die Fläche an eisbildenden Gebieten durch verbesserte Erkennung von schmalen Rinnen erweitert (Abb. 9). Werden identifizierte Eistrinnen als offene Wasserflächen parametrisiert (kein dünnes Eis), erhöht sich die saisonale Eisproduktion um bis zum Vierfachen der Eisproduktion in den Polynjen im Vergleich zu Mikrowellen-Satellitendaten. Dabei handelt es sich durch die Annahme offenen Wassers um die Abschätzung des potentiellen Anteils der Eistrinnen. Um eine genauere Quantifizierung der Eisproduktion in Eistrinnen zu erreichen, sind weitere Untersuchungen nötig, die den tatsächlichen Wärmeverlust in einzelnen Eistrinnen erfassen können. Für eine Erfassung des subskaligen Anteils der Eistrinnen wird es notwendig sein, mit hubschrauber- und/oder flugzeuggestützten Messungen eine repräsentative Größenverteilung (Breite) von Eistrinnen im Skalenbereich von wenigen Metern bis zu mehreren Kilometern zu erfassen.

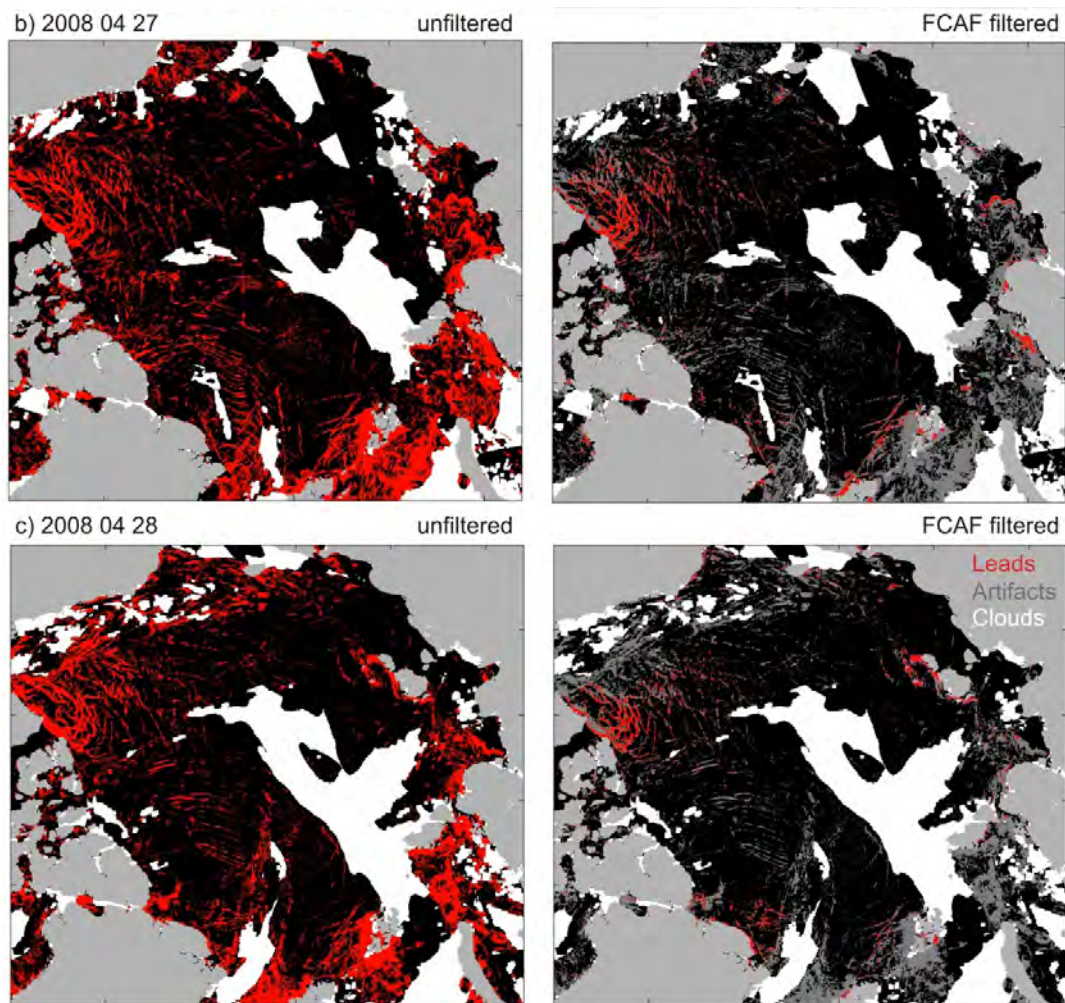


Abb. 7: Ungefilterte panarktische Eistrinnenkarten und das Ergebnis nach der Filterung (FCAF) für zwei aufeinanderfolgende Tage im April 2008: 27. April (oben) und 28. April 2008 (unten). Eistrinnen sind rot dargestellt, die MODIS-Wolkenmaske weiß und die herausgefilterten Eistrinnenobjekte grau.

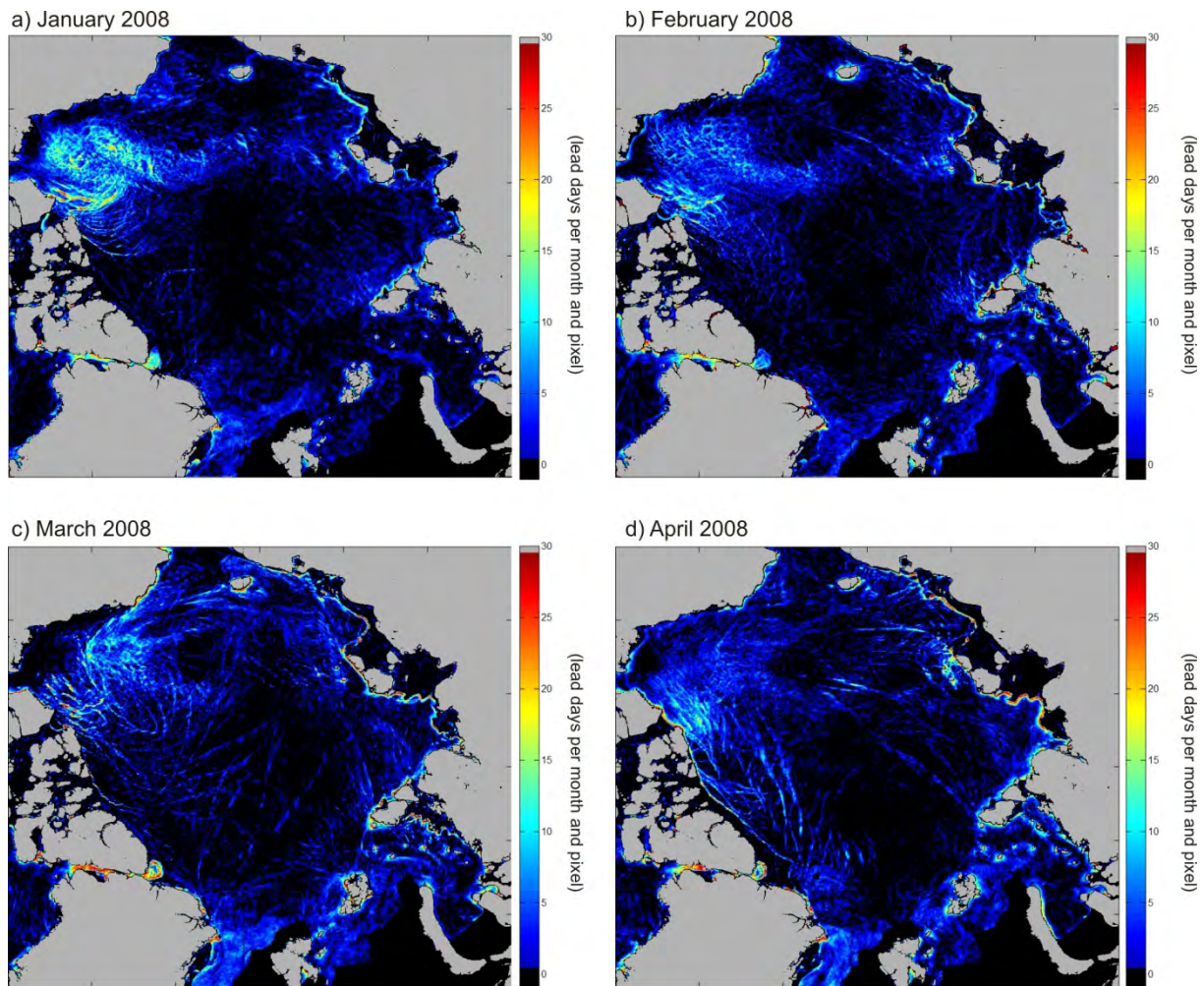


Abb. 8: Eisrinnentage pro Monat und Pixel für die Monate Januar-April 2008.

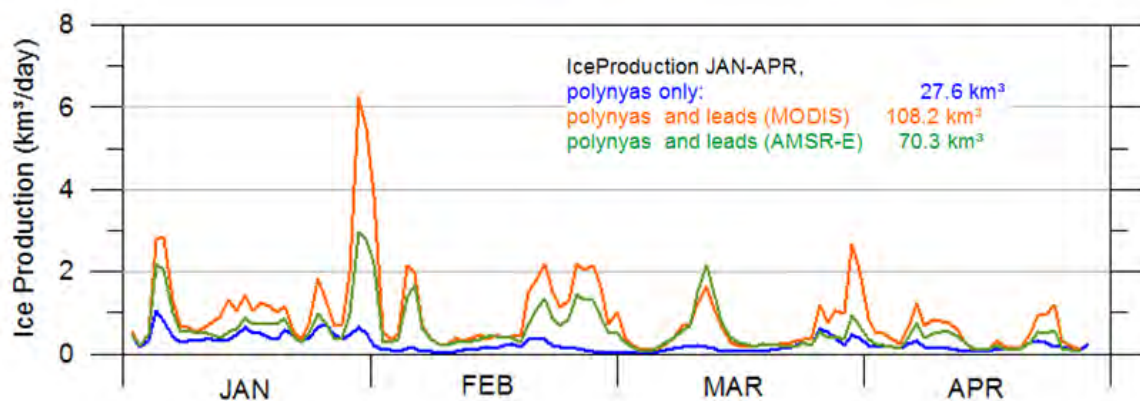


Abb. 9: Tägliche Eisproduktionsraten für die Laptev-See von Januar bis April 2008 für a) die nach Willmes et al. (2011) aus SSM/I (Special Sensor Microwave Imager)-Daten abgeleiteten Polynjen (blau), b) für a) inklusive der Eisrinnen aus AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer – Earth Observing System)-Daten nach Röhrs et al. (2012) (grün) und c) für a) inklusive der aus MODIS-Daten abgeschätzten Eisrinnen (orange). Eisrinnen wurden bei der Berechnung der Eisproduktion als eisfrei angenommen.

Numerische Modellierung (AP2)

Analyse von Klima- und Meereis/Ozean-Modellen für die Arktis

Zur Analyse der Rolle der Laptev-See für den Eishaushalt der Arktis wurden Simulationen mit dem gekoppelten Eis/Ozean-Modell NAOSIM (Gerdes et al., 2003) und drei CMIP5-Klimamodellen (Taylor et al., 2012) ausgewertet (Tab. 3). Für die Verifikation des Eisvolumens wurde der PIOMAS-Datensatz verwendet (Zhang & Rothrock 2003).

Tab. 3: Verwendete Modelle und Daten

		Auflösung
CMIP5-Modelle (global)	CanESM2 (Canadian Earth System Model), Canada, Chylek et al. (2011)	2,8°*2,8°
	GFDL-CM3 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory-Climate Model 3), NOAA, Griffies et al. (2011)	1°*0,85°
	Miroc5, Japan, Watanabe et al. (2011)	1,14°*0,8°
Regionales Modell	NAOSIM, Gerdes et al. (2003)	9 km
Verifikationsdaten	PIOMAS (Pan-Arctic Ice-Ocean Modeling and Assimilation System), Zhang und Rothrock (2003)	6-75 km

Die NAOSIM-Simulationen zeigen, dass die sibirische Laptev-See die wichtigste Eisproduktionsregion der Arktis ist (Abb. 10). Zugleich ist die interannuelle Variabilität der Eisproduktion in der Laptev-See am geringsten. Auf der anderen Seite stellt die Framstraße am Ende der transpolaren Drift die Netto-Exportregion der Arktis dar.

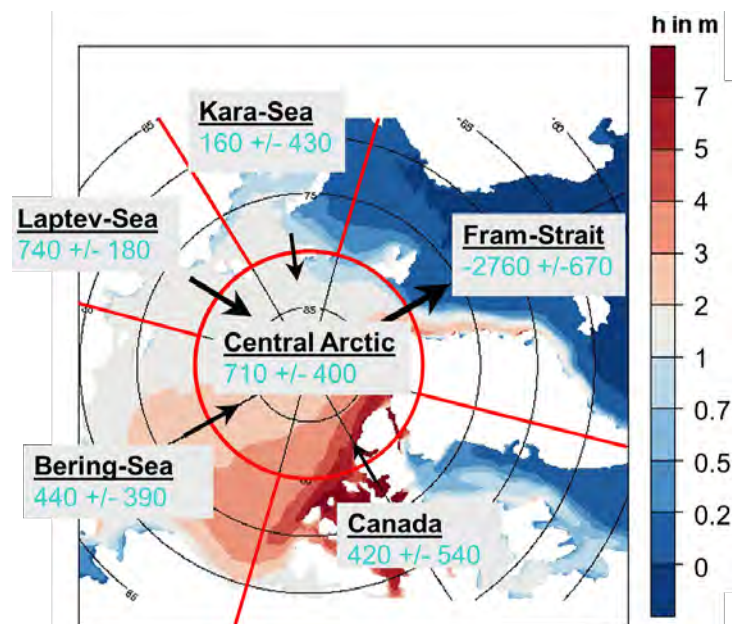


Abb. 10: Mittlere Eisdicke (in m, Farbskala), Eisproduktion (km³/a) und jährliche Standardabweichung aus NAOSIM-Simulationen mit 9 km Auflösung (NCEP-Antrieb) für den Zeitraum 1990-2008.

Im Vergleich mit SSM/I-Daten der Meereisfläche zeigen alle Modelle bis auf CanESM2 eine gute Übereinstimmung (Abb. 11a), wobei NAOSIM die Fläche im Herbst unter- und im Frühjahr überschätzt. Beim Eisvolumen ergeben sich große Unterschiede zwischen den Modellen (Abb. 11b). Im Vergleich zu den PIOMAS-Daten zeigt hier NAOSIM eine gute Übereinstimmung mit einer leichten Unterschätzung im Sommer und einer Überschätzung im Winter. Die Modelle CanESM2 und GFDL_CM3 zeigen immer eine deutliche Unterschätzung des Eisvolumens.

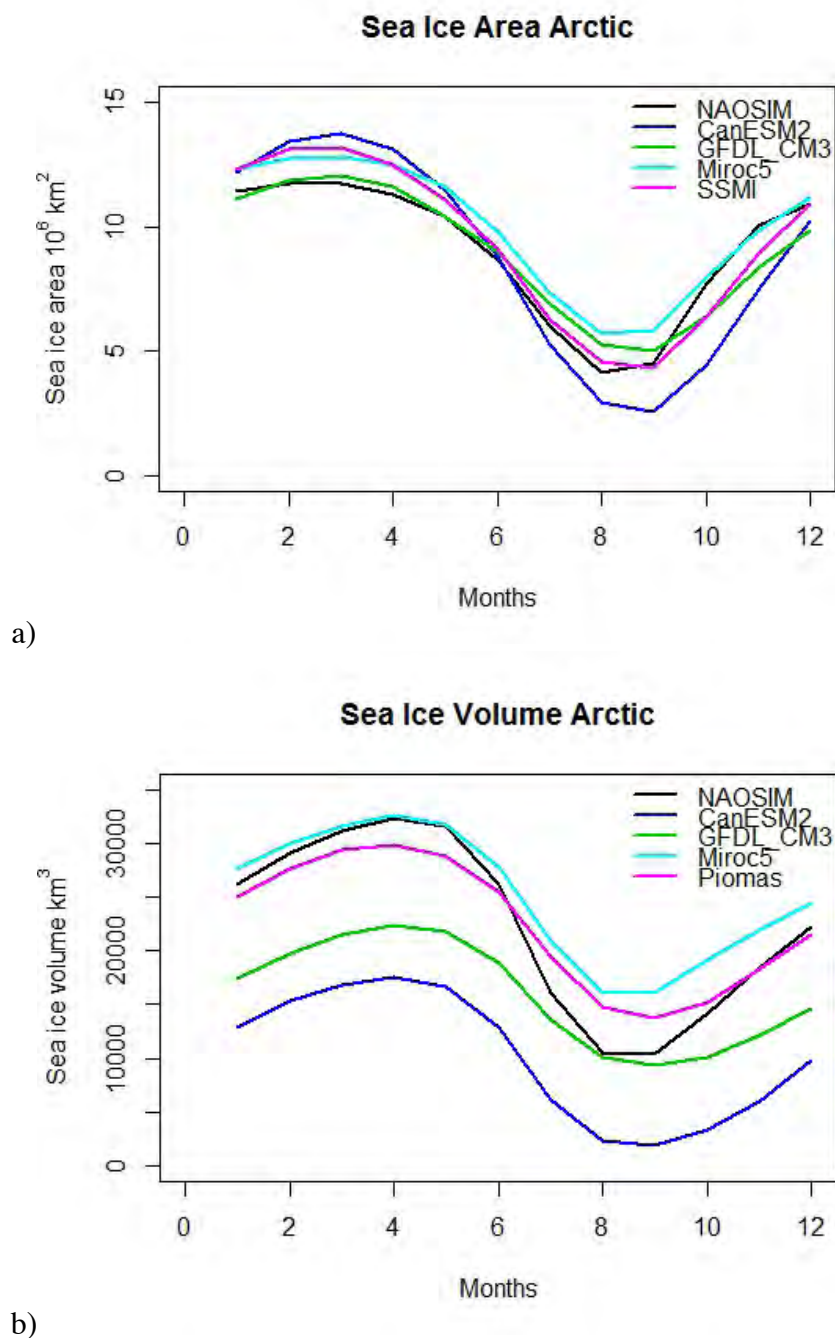


Abb. 11: a) Meereisfläche (gesamte Arktis) für NAOSIM und CMIP5-Modelle im Vergleich zu SSM/I-Daten für den Zeitraum 1990-2008; b) Meereisvolumen (gesamte Arktis) für NAOSIM und CMIP5-Modelle im Vergleich zu PIOMAS-Daten für den Zeitraum 1990-2008.

COSMO-Simulationen für die Winter 2007-2009

- Untersuchung der Eisproduktion

Das mesoskalige, nicht-hydrostatische Modell COSMO wurde bereits in der ersten Projektphase für die Laptev-See implementiert (Schröder et al., 2011). Simulationen werden in einem doppelten Nesting-Verfahren (globale Analysen, COSMO-15km, COSMO-5km) durchgeführt. Abbildung 12 zeigt die Modellgebiete.

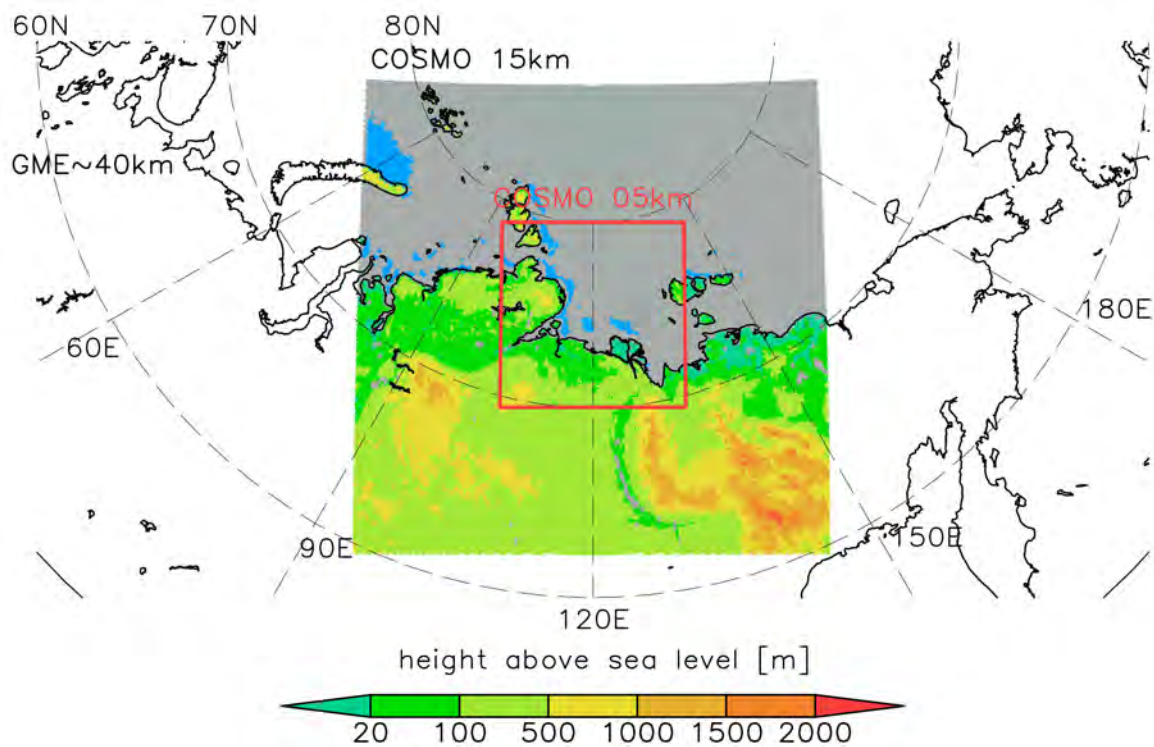


Abb. 12: Modellgebiete für COSMO-15km und COSMO-5km mit Topographie. Polynjen für den 10. Januar 2009 sind als blaue Flächen dargestellt.

Die Bestimmung von Eisproduktionsraten aus COSMO-Simulationen und Fernerkundungsverfahren basiert auf der Energiebilanzgleichung an der Oberfläche:

$$Q_0 - H_0 - E_0 - B_0 = 0$$

Dabei ist Q_0 die Strahlungsbilanz, H_0 die turbulente Flussdichte sensibler Wärme, E_0 die turbulente Flussdichte latenter Wärme und B_0 der Bodenwärmestrom. Die Strahlungsbilanz wird durch die kurzwellige (solare) Globalstrahlung, die Reflektion an der Oberfläche, die langwellige (infrarote) Einstrahlung aus der Atmosphäre und die langwellige Strahlung von der Oberfläche in die Atmosphäre beschrieben. Über einer winterlichen Polynja (Wassertemperatur am Gefrierpunkt) kann der Gesamtenergieverlust in die Atmosphäre $Q_0 - H_0 - E_0$ nur

durch die Freisetzung latenter Wärme durch Gefrieren von Wasser kompensiert werden. Bei Fernerkundungsverfahren werden die benötigten Flussdichten mit einfachen Differenzverfahren (turbulente Flussdichten) und empirischen Formeln (Strahlungsflussdichten) berechnet, wobei atmosphärische Daten (meist Reanalysen) als Antriebsdaten dienen. Dabei kann nicht berücksichtigt werden, dass die Polynja die atmosphärische Grenzschicht modifiziert (Ebner et al., 2011). Vor dem Hintergrund der stark differierenden Ergebnisse für die Eisproduktion aus Fernerkundungsverfahren (Tamura & Oshima, 2011; Willmes et al., 2011; Martin et al., 2004) wurde im Projekt eine weitere, unabhängige Methodik entwickelt, indem zur Berechnung der Eisproduktion hochaufgelöste Simulationen (5 km) mit dem COSMO-Modell (genestet in GME-Daten; Schröder et al., 2011) verwendet werden. Die Berechnung der turbulenten Energieflussdichten erfolgt im Modell mit etablierten Parametrisierungen (Louis, 1979), die Strahlungsflussdichten werden mit einem Strahlungstransportmodell (Ritter & Geleyn, 1992) berechnet. Da die Polynjen aus AMSR-E mit 6.25-km-Auflösung dem Modell täglich vorgegeben werden, sind die Effekte der Polynjen auf die Atmosphäre in den COSMO-Simulationen enthalten.

Es wurden tägliche COSMO-Simulationen für die Winter 2007/08 und 2008/09 durchgeführt und stündliche Eisproduktionsraten aus den Simulationsergebnissen ermittelt. Dabei wurde die Sensitivität der Eisproduktion bezüglich der Dünneisdicke der Polynjafläche untersucht. Hierzu wurden Simulationen unter der Annahme von eisfreien und mit 10 cm Dünneis bedeckten Polynjen durchgeführt und mit der Eisproduktion aus Satellitendaten von Willmes et al. (2011) verglichen. Aufgrund der leicht unterschiedlichen Flächenabdeckung wurden alle Daten aus Willmes et al. (2011) auf das COSMO-5km-Gebiet angepasst. Unter der Annahme von eisfreien Polynjen (C00) wird deutlich mehr Eis in den Polynjen produziert (Tab. 4) als bei Willmes et al. (2011). Unter der Annahme einer 10 cm dicken Dünneisbedeckung (C10) in den Polynjen verringert sich die Eisproduktion aus den COSMO-Simulationen und die Differenzen zu Willmes et al. (2011) werden kleiner.

Tab. 4: Eisproduktion (km³) der Winter (Nov-Apr) 2007/2008 und 2008/2009 für eisfreie Polynjen (C00) und für Polynjen mit 10 cm Dünneis (C10) sowie die Ergebnisse aus Willmes et al. (2011) und aus FESOM-Simulationen mit der Assimilation von MODIS-Dünneisdicken

	2007/2008	2008/2009
C10	30	73
C00	49	123
Willmes et al. (2011)	34	59
FESOM-MODIS	76	97

Abbildung 12 zeigt Zeitreihen für die 2-m-Temperatur, Polynjafläche und Eisproduktion auf Tagesbasis für den Winter 2008/09. Deutlich zu erkennen ist (Abb. 12a), dass die mittleren Temperaturen in den COSMO-Simulationen mit eisfreien Polynjen (C00) am höchsten sind (-12.2°C), gefolgt von den Simulationen C10 mit 10 cm Dünneis (-17.7°C) und den NCEP-Daten (-18.9°C). Betrachtet man die gesamte Laptev-See, dann sind die 2-m-Temperaturen in beiden COSMO-Simulationen fast gleich und unterscheiden sich nur bei sehr großen Polynja-Ereignissen (Abb. 12b). Die NCEP-Daten weisen über lange Zeiträume höhere 2-m-Temperaturen auf als die hochaufgelösten COSMO-Simulationen. Da die NCEP-Daten kein Polynja-Signal enthalten, sind die 2-m-Temperaturen über Polynjen zu kalt (Abb. 12a). Dieser Effekt wird aber durch den generellen „Warm-Bias“ der NCEP-Daten abgemildert. Dieser Befund wird auch für den Winter 2007/08 bestätigt (Tab. 5). Die Qualität der COSMO-Daten im Vergleich zu NCEP-Daten wurde in Ernsdorf et al. (2011) mit In-situ-Beobachtungen der TRANSDRIFT-XIII-Winterexpedition 2008 verifiziert (s. auch weiter unten). Die Temperaturmessungen an der Festeiskante (Heinemann et al., 2008) werden durch die COSMO-Simulationen besser als durch NCEP-Daten dargestellt (BIAS/RMSE: $0,0/2,5^{\circ}\text{C}$ COSMO und $-1,5/4,5^{\circ}\text{C}$ NCEP).

Tab. 5: Wintermittel (Nov-Apr) der 2-m-Temperatur ($^{\circ}\text{C}$) für Polynjen (Pol), der gesamten Laptev-See (Lap) und die Differenzen

	Polynja		Gesamte Laptev-See		Differenz (Pol-Lap)	
	2007/2008	2008/2009	2007/2008	2008/2009	2007/2008	2008/2009
NCEP	-20,9	-18,9	-23,8	-23,0	2,9	4,1
C00	-12,9	-12,2	-24,7	-25,7	11,8	13,5
C10	-18,5	-17,7	-24,7	-25,9	6,2	8,2

Wie in Arbeitspaket 1 dargestellt, hat die Lufttemperatur einen entscheidenden Einfluss auf die Berechnung von Eisproduktionsraten aus MODIS-Fernerkundungsdaten. Dies trifft auch auf die in Willmes et al. (2011) verwendete Methodik zu, bei der Dünneisdickenverteilung aus MODIS-Daten (durchschnittlich 10 cm) und NCEP-Daten verwendet werden. Durch die generelle Überschätzung der NCEP-2-m-Temperatur über der gesamten Laptev-See wird aber eine Überschätzung der Eisproduktion in den Polynjen in Willmes et al. (2011) verhindert.

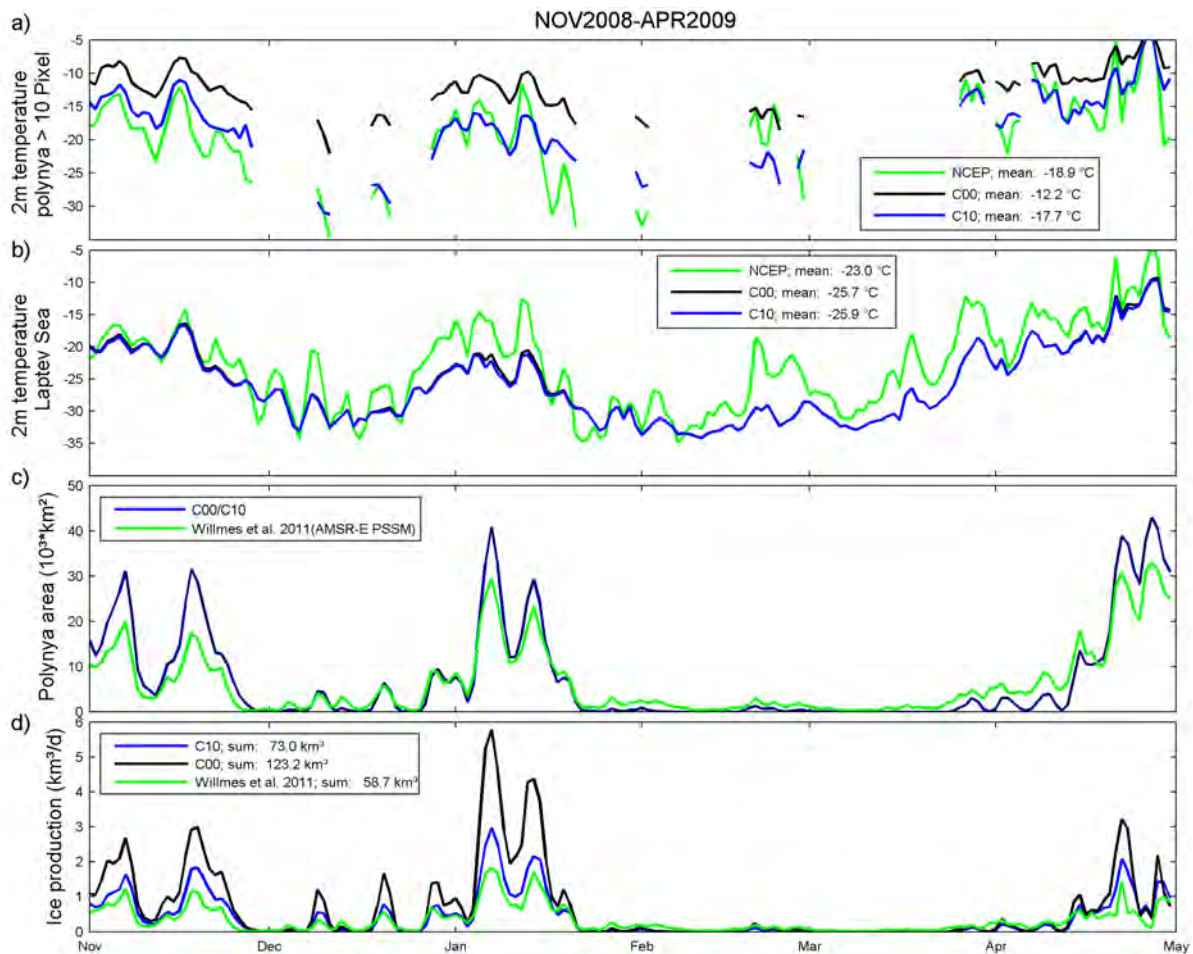


Abb. 12: Tagesmittel für Nov. 2008-April 2009; a) 2-m-Temperatur über Polynjen für NCEP-Daten und COSMO-Simulationen mit 10 cm Dünneis (C10, blau) bzw. mit offenem Wasser in den Polynjen (C00, schwarz), b) wie a), aber für die gesamte Laptev-See, c) Polynjafläche in COSMO (aus AMSR-Eiskonzentrationen) und in Willmes et al. (2011), d) wie c), aber für die Eisproduktion. Werte in a) sind nur für ausreichend große Polynjen dargestellt (mindestens 10 Polynjapixel in COSMO, d. h. ca. 300 km²).

Abbildung 13 zeigt die Verteilung der Eisproduktion für die Laptev-See für die beiden Winter. Die höchste akkumulierte Eisproduktion findet sich in der westlichen Laptev-See (Nordost-Taimyr (NET), Abb. 14) statt. Hier werden pro Winter bis zu 5 m bei C00 und 3 m bei C10 produziert. Während die NET-Polynja in beiden Jahren eine große Breite aufweist, findet die Eisproduktion in den anderen Teilpolynjen in relativ schmalen Zonen entlang der Festeiskante statt. Dies zeigt, dass eine hohe Auflösung der Meereiskonzentration aus Satellitendaten sowie der atmosphärischen Daten bei der Beschreibung der Atmosphären/Meereis-Prozesse und der Eisproduktion für die Laptev-Polynjen von großem Vorteil ist. Abbildung 14 zeigt die akkumulierte Eisproduktion und Flächenmittel der Produktionsraten an Polynja-Tagen für Teilgebiete der Laptev-See (Nordost-Taimyr (NET), Taimyr (T), Anabar-Lena (AL) und West-Neusibirisches (WNS)). Für Polynja-Tage weisen die COSMO-Ergebnisse für 2007/08 für alle Regionen etwa die gleiche Eisproduktionsrate (m/d) auf,

2008/09 findet sich die stärkste Eisproduktionsrate in der WNS-Polynja. Da die Anzahl der Polynja-Tage und die Polynja-Fläche 2008/09 aber relativ klein sind, ist die Volumen-Eisproduktion (km^3/a) in der WNS-Polynja deutlich geringer als in AL und NET. Im Vergleich zu Willmes et al. (2011) zeigen sich deutliche regionale Unterschiede, insbesondere eine höhere Eisproduktion für die westliche Laptev-See.

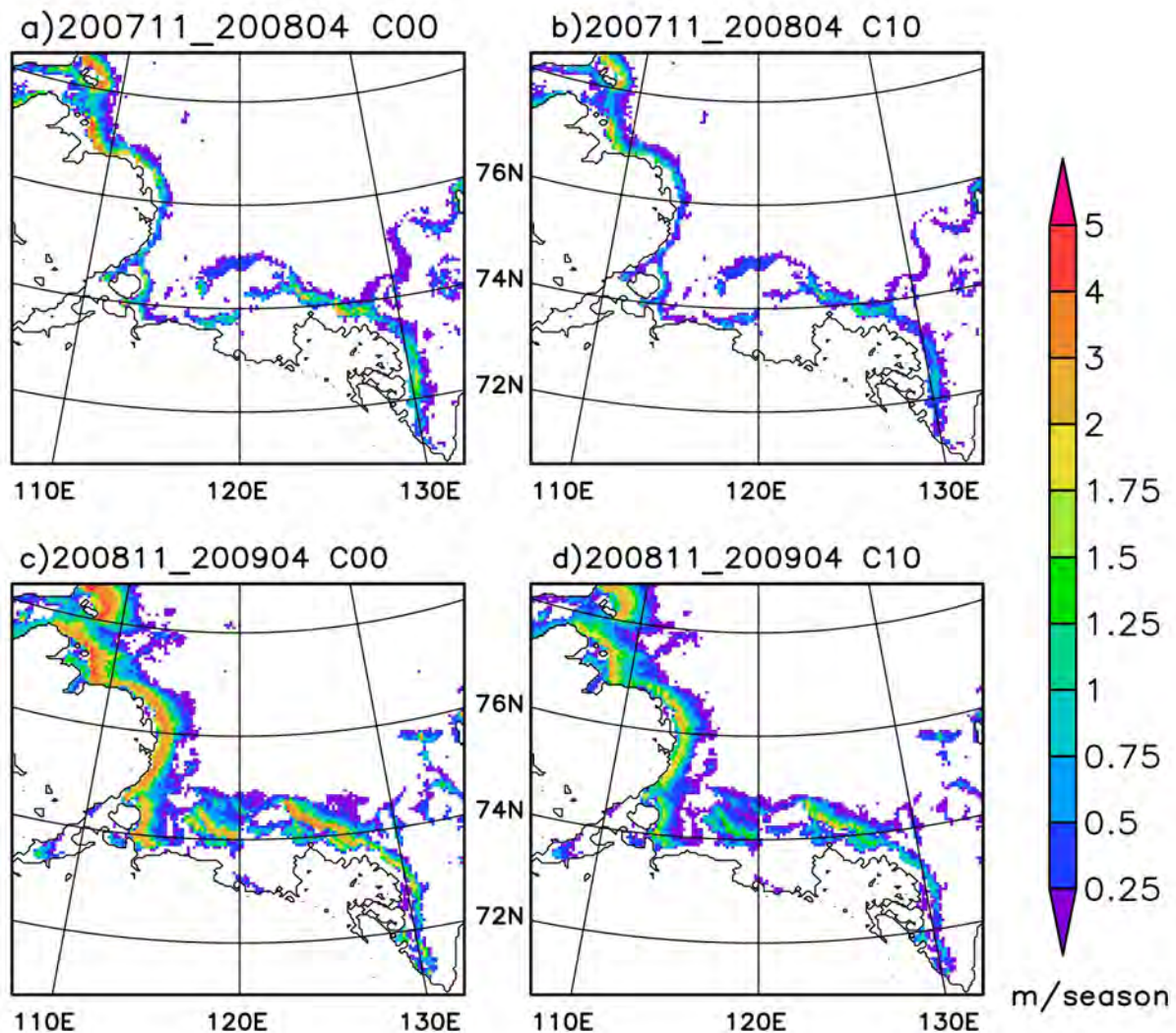


Abb. 13: Summe der Eisproduktion für die beiden Winter (November-April) 2007/2008 (oben) und 2008/09 (unten). Die linken Teilbilder sind die Berechnungen für die Annahme einer eisfreien Polynja (C00), die rechten Teilbilder wurden mit der Annahme einer Eisdicke von 10 cm berechnet (C10).

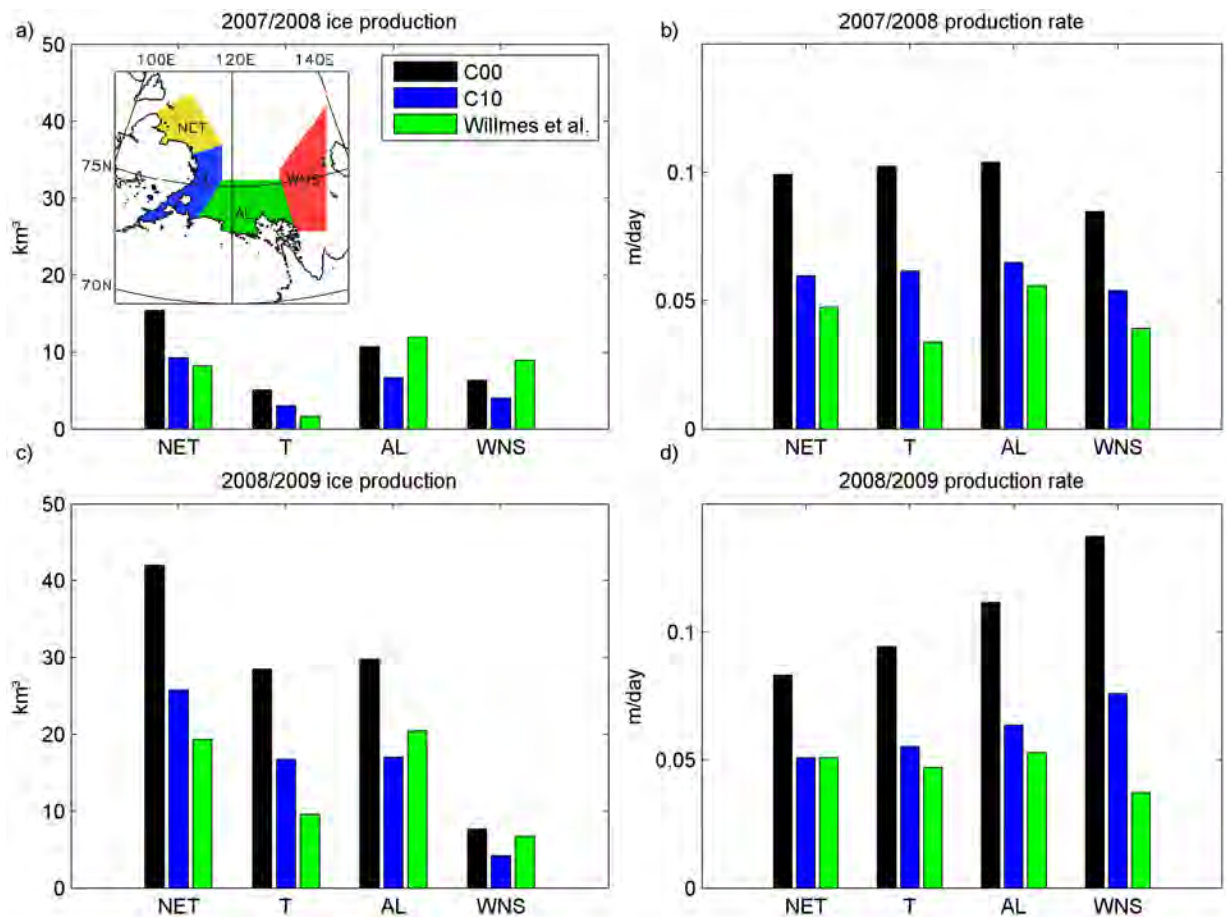


Abb. 14: Akkumulierte Eisproduktion (a, c) und Flächenmittel der Produktionsraten an Polynja-Tagen (b, d) für Teilgebiete der Laptev-See (Nordost-Taimyr (NET), Taimyr (T), Anabar-Lena (AL), West-Neusibirisches (WNS), s. Karte in (a)). Willmes et al. (2011) (grün), C10 (blau), C00 (schwarz).

- Modifikation der atmosphärischen Grenzschicht

Der Einfluss der Polynjen auf die atmosphärische Grenzschicht wurde mit zwei Ansätzen untersucht: a) Vergleich der Simulationen C00 und C10 mit einem COSMO-Lauf mit 100% Meereisbedeckung, b) Vergleich der COSMO-Simulationen mit den GME-Antriebsdaten (40 km Auflösung).

Für die Winter 2007/08 und 2008/09 wurden die COSMO-15km- und COSMO-5km-Simulationen wiederholt, wobei die Eisdicke in den nach AMSR-E-Eisdaten erkannten Polynjen mit 1 m angenommen wurde. Da alle sonstigen Antriebsdaten gleich bleiben, kann so der Polynjeneinfluss auf die Atmosphäre für reale Bedingungen studiert werden (im Unterschied zu den idealisierten Studien von Ebner et al., 2011).

Abbildung 15 zeigt die 2-m-Temperatur für eine Fallstudie für das COSMO-5km-Gebiet. Bei ablandigem Wind hat sich im AL-Gebiet eine schmale Polynja entlang der Festeiskante

gebildet. Der Vergleich mit dem Lauf ohne Polynja zeigt deutlich die erhöhten Lufttemperaturen im Polynja-Bereich, aber auch noch Temperatursignale 100-200 km windabwärts. Im Querschnitt von C00 erkennt man, dass die konvektive Grenzschicht über dieser sehr schmalen Polynja bis zu 400 m hoch ist und eine maximale Temperaturerhöhung von 5 K aufweist (Abb. 16a). In den untersten 100m wird der Wind um bis zu 4 m/s erhöht, oberhalb von 150 m durch die verstärkte Durchmischung dagegen abgebremst. In den untersten 100 m nimmt der Wolkenbedeckungsgrad um mehr als 50% zu. Deutliche Temperatur- und Wolken-signale sind noch 300 km windabwärts der Polynja erkennbar. Wenn die Polynja mit dünnem Eis bedeckt ist, sind die Effekte kleiner, beeinflussen aber auch die Atmosphäre bis 100 km windabwärts (Abb. 16b). Bei größeren Polynjen zeigen sich auch für den C10-Lauf große Effekte bis in 300 km Entfernung.

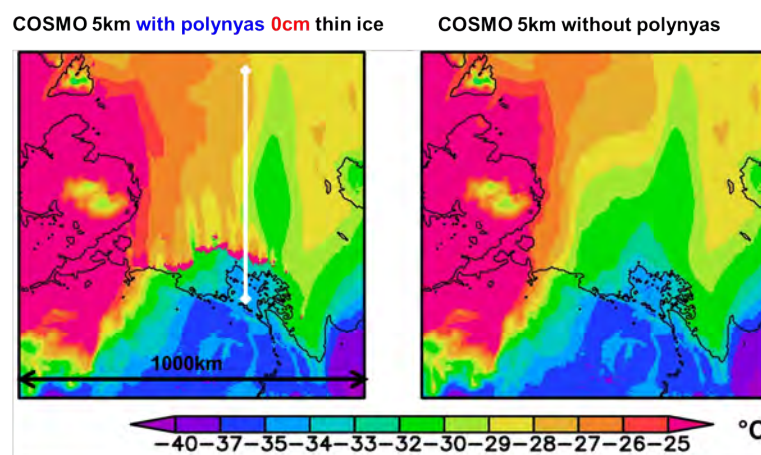


Abb. 15: 2-m-Temperatur für den 4. Januar 2008 07 UTC (COSMO mit GME-Antrieb). Links: Polynjen mit offenem Wasser (C00); rechts: keine Polynjen. Die weiße Line markiert einen Querschnitt (s. Text).

Der Effekt der Polynjen lässt sich gut im Vergleich zu den GME-Antriebsdaten dokumentieren (Abb. 17). Für Monate mit hoher Polynja-Aktivität zeigt sich ein deutliches positives Temperatursignal im Bereich der Polynjagebiete, während bei geringer Polynja-Aktivität kaum Unterschiede zu den GME-Daten zu sehen sind. Abseits der Polynjagebiete zeigt COSMO im Vergleich zu GME eine Tendenz zur Unterschätzung der Temperatur im Januar und zu einer Überschätzung im April. Insgesamt zeigen die COSMO-Simulationen, dass die Polynjen auch auf klimatologischen Zeitskalen einen deutlichen Einfluss auf die bodennahe Atmosphäre haben.

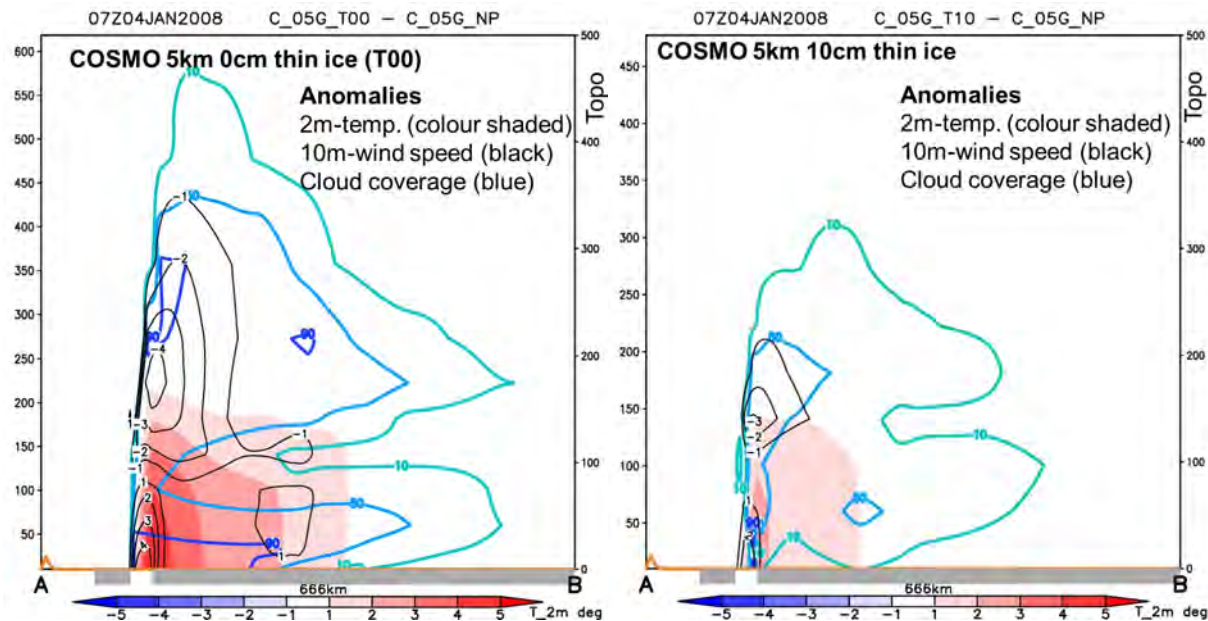
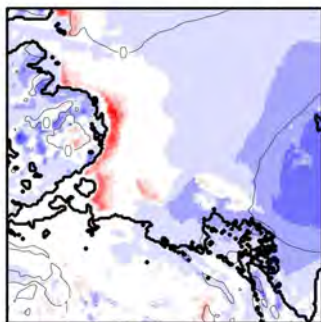


Abb. 16: Querschnitt für den 4. Januar 2008 07 UTC entlang der Linie in Abbildung 15 (Länge ca. 670 km) für die Differenzen zwischen den Läufen mit und ohne Polynjen: Temperatur (Farbskala), Windstärke (schwarze Isolinien, Abstand 1 m/s) und Wolkenbedeckungsgrad (farbige Isolinien 10, 50, 90%), Meereis als graue horizontale Balken, Höhe über Grund in m (linke Achse). Links a): Polynjen mit offenem Wasser (C00); rechts b): Polynjen mit 10 cm Eis (C10).

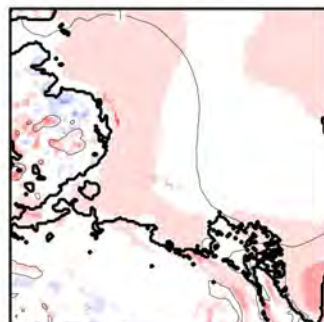
a) Januar 2009

C_05G_T10-GME/PMSL T2m [Grad C/hPa]



b) März 2009

C_05G_T10-GME/PMSL T2m [Grad C/hPa]



c) April 2009

C_05G_T10-GME/PMSL T2m [Grad C/hPa]

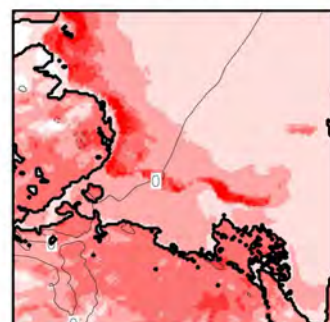


Abb. 17: Mittlere Anomalien des Bodendrucks (MSLP, Isolinien, Abstand 1hPa) und der 2-m-Temperatur (Farbskala) für den COSMO-C10-Lauf im Vergleich zu GME für Monate mit hoher Polynja-Aktivität (Januar und April 2009) und geringer Polynja-Aktivität (März 2009).

- Vergleich der Simulationen mit In-Situ- und Fernerkundungsdaten

Zur Verifizierung der COSMO-Simulationen wurden Messdaten der Expeditionen TRANSDRIFT XIII und XV verwendet. Im Zuge dieser Feldkampagnen wurden mit mehreren automatischen Wetterstationen, die am Rand des Festeises installiert wurden, Atmosphärendaten im März/April 2008, 2009 und 2012 gemessen. Der von Ernsdorf et al.

(2011) durchführte Vergleich der Messdaten mit COSMO-Simulationen wurde für 2009 erweitert und auf weitere Größen (Luftdruck, Strahlungsbilanz) ausgedehnt (Tab. 6). Die hohe Güte der COSMO-Simulationsergebnisse bei der 2-m-Temperatur wird auch hier bestätigt. Auch Wind und Luftdruck werden gut simuliert. Bei der Strahlungsbilanz ist die mittlere Abweichung klein, aber der RMSE (root-mean-square-error) relativ groß. Dies lässt auf Unter- und Überschätzung der Wolkenbedeckung schließen. Da die COSMO-Antriebsdaten (GME) unabhängig von den Messungen sind und die Messungen in einer sonst datenleeren Region durchgeführt wurden, ist das Ergebnis der Verifikation als sehr gut zu bewerten.

Tab. 6: Verifizierung der COSMO-Simulationen mit Messdaten. Bias und RMSE berechnet aus allen verfügbaren Messstationen (April 2008: 4 Stationen; April 2009: 2 Stationen)

	Bias	RMSE
10-m-Windgeschwindigkeit (m/s)	-0,54	1,54
2-m-Temperatur (K)	-0,18	2,74
Luftdruck (hPa)	-0,72	1,46
Strahlungsbilanz (W/m ²)	-1,02	30,5

- Modellsimulationen für die Winterdekade 2002-2011

Da für Zeiträume vor 2007 keine GME-Antriebsdaten für das COSMO-Modell vorliegen, wurden die COSMO-Simulationen für das Nesting in ERA-Interim-Daten (ERA-I, European Centre for Medium Range Weather Forecasts reanalysis, ECMWF; Dee et al., 2011) angepasst. Diese Daten liegen für den Zeitraum 1979-2011 mit einer Auflösung von ca. 80 km vor. Direkte Vergleiche der COSMO-ERA-I-Läufe mit den COSMO-GME-Läufen zeigen nur geringe Differenzen. Dies bedeutet, dass in der Nesting-Kette GME/ERA-> COSMO-15km-> COSMO-5km die atmosphärische Dynamik im Gebiet der Laptev-See im Wesentlichen durch die COSMO-Simulationen bestimmt wird. Die Simulationen wurden für die Winter 2002/03 bis 2010/11 fertiggestellt. Dazu wurde eine Dünneisdicke von 10 cm in den Polynjen angenommen. Die berechnete Eisproduktion der Winter 2002/03-2008/09 zeigt Abbildung 18. Der Vergleich mit der Eisproduktionsabschätzung basierend auf Satellitendaten nach Willmes et al. (2011) zeigt konsistente Ergebnisse und bestätigt, dass die Eisproduktion in den Polynjen deutlich geringer ist als dies in früheren Arbeiten (z. B. Dethleff et al., 1998) und auch in der SSM/I-basierten Studie von Tamura und Ohshima (2011) gefunden wurde. Als Mittel über die Winter 2002-2009 ergeben sich aus den COSMO-Simulationen 39 km³/a, das Mittel aus der Studie Willmes et al. (2011) beträgt 46 km³/a.

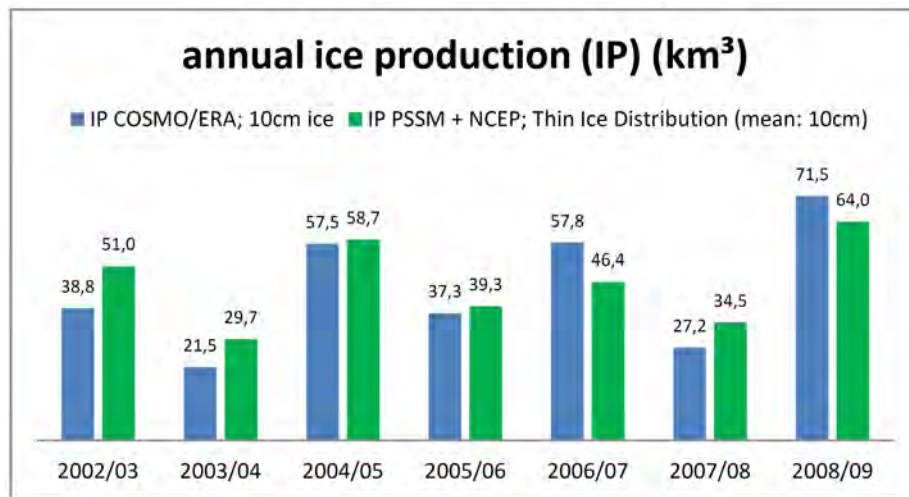


Abb. 18: Wintereisproduktion der Laptev-See-Polynjen (2002/03-2008/09); blau: COSMO/ERA-Eisproduktion, grün: Eisproduktion nach Willmes et al. (2011).

FESOM-Simulationen

- Assimilation von Dünneisdicken in FESOM

Die mit Hilfe von MODIS-Eisoberflächentemperaturen berechneten Dünneisdicken (Arbeitspaket 1) erlauben die Erstellung von Tageskompositen mit einer räumlichen Abdeckung von ca. 60%. Für quantitative Studien der Polynjendynamik und Eisproduktion ist jedoch eine vollständige Abdeckung wichtig. Mit COSMO-Simulationen angetriebene Läufe mit dem Meereis/Ozean-Modell FESOM (Timmermann et al., 2009) simulieren die Polynjenflächen und die Dünneisdicken innerhalb der Polynjen größtenteils realitätsnah (Ernsdorf et al., 2011). Daher wurde eine Methode der Assimilation von MODIS-Dünneisdicken in FESOM entwickelt, bei der eine Optimale Interpolation angewendet wird. Für die Optimale Interpolation sind Annahmen über die Fehlercharakteristika von FESOM und des MODIS-Produkts nötig. Die Standardabweichung der FESOM-Eisdicken in Bezug auf das MODIS-Eisdicken-Produkt beträgt 11 cm, daher wurde der FESOM-Fehler mit 10 cm angesetzt. Die Fehleruntersuchung der MODIS-Retrievals (s. Arbeitspaket Fernerkundung) wurde zur Ermittlung der Gewichte für die Assimilation von MODIS-Dünneisdicken in FESOM in den Eisdickenklassen 0-5 cm, 5-10 cm, 10-15 cm und 15-20 cm herangezogen. Mit dem Antrieb aus COSMO-Simulationen wurden monatliche Assimilationsläufe für die beiden Winter 2007/08 und 2008/09 durchgeführt.

Der Einfluss der Assimilation wird exemplarisch in Abbildung 19 gezeigt. Wenn MODIS-Eisdicken vorliegen (A und D), unterscheiden sich die Assimilationsläufe kaum von den MODIS-Retrievals (E und H). Wenn keine MODIS-Daten (B) oder nur gebietsweise MODIS-Daten (C) vorhanden sind, zeigen die Assimilationsläufe eine physikalisch sinnvolle Polynjenentwicklung (F und G).

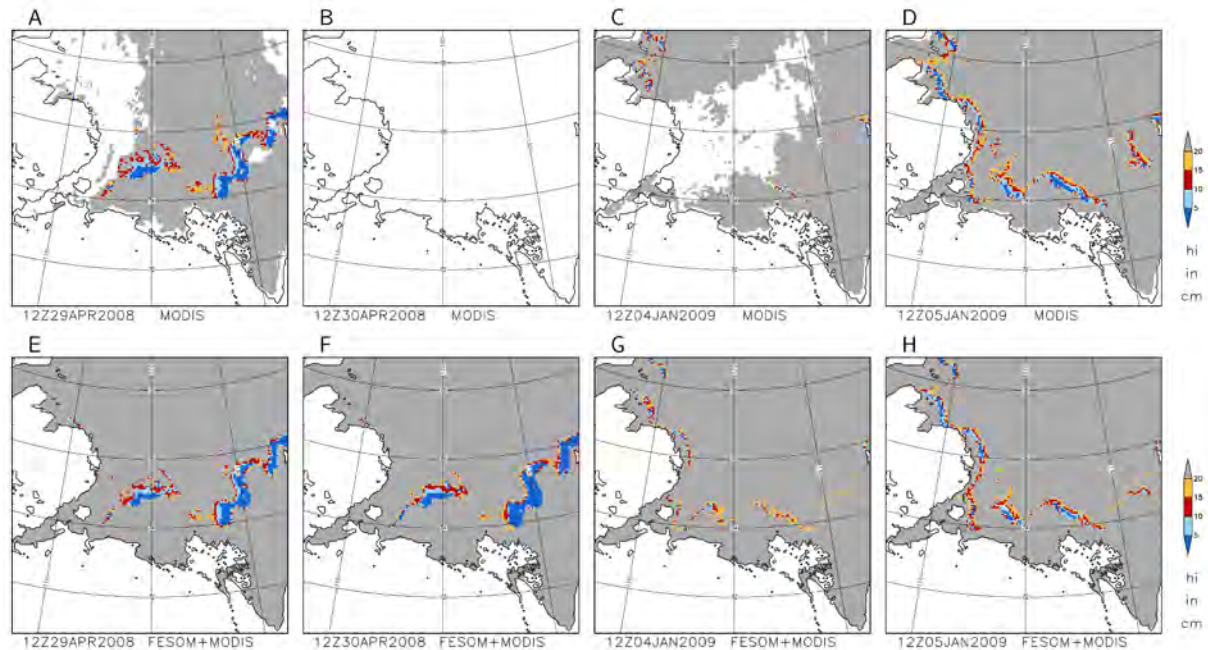


Abb. 19: Dünneisdickenverteilung (in cm) in den Laptev-See-Polynjen für den 29. und 30. April 2008 sowie für den 4. und 5. Januar 2009 aus MODIS-Retrievals (A-D) und aus FESOM-Modellsimulationen mit assimiliertem MODIS-Dünneisdicken (E-H). Land und Gebiete, wo keine MODIS-Daten vorliegen, sind weiß dargestellt.

Auf diese Weise wurde ein 3-stündlicher Dünneisdickendatensatz mit einer horizontalen Auflösung von 5 km für die Winter 2007/08 und 2008/09 erstellt. Als ein Gesamtergebnis für die Polynjadynamik für unterschiedliche Eisklassen zeigt Abbildung 20 die zeitliche Entwicklung im Winter 2007/08.

Satellitenverfahren mit passiven Mikrowellen (AMSR-E, SSM/I) haben beim Vorhandensein von Dünneis oft Probleme, Polynjen korrekt zu detektieren. Das Assimilationsverfahren hat den großen Vorteil, dass aufgrund der höheren räumlichen Auflösung und der Verwendung der thermischen Signatur in den MODIS-Retrievals einerseits Polynjen besser erkannt, andererseits die mit optischen Methoden unvermeidlich verbundenen Datenlücken dynamisch konsistent geschlossen werden. Das Verfahren ist nicht auf die Laptev-See beschränkt, sondern kann auch für andere Regionen in der Arktis und Antarktis angewendet werden.

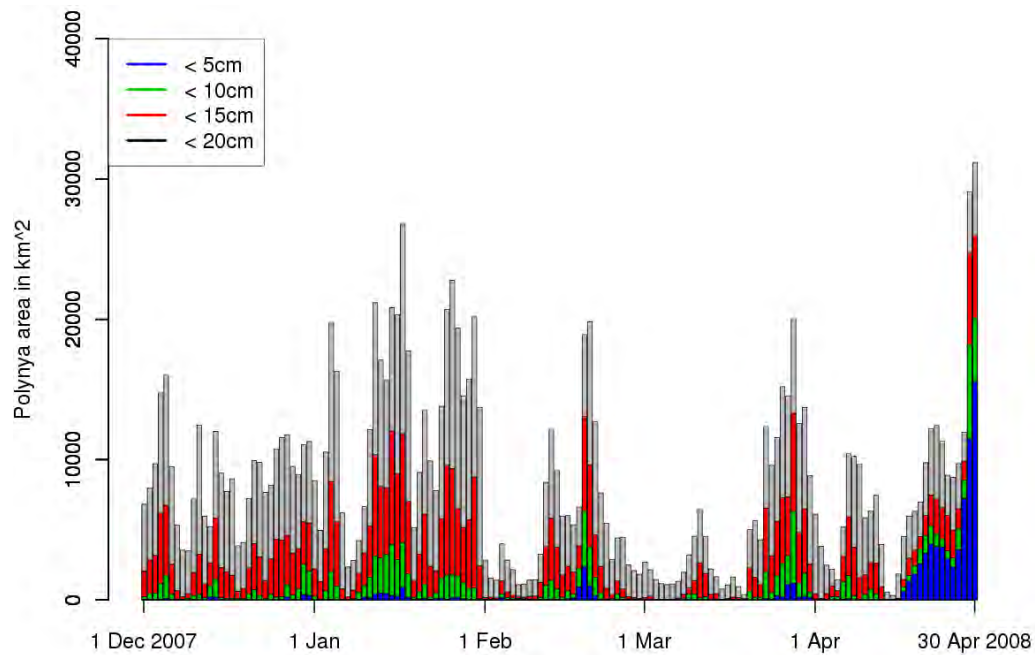


Abb. 20: Polynjafläche für Dünneisdicken-Klassen nach Assimilation von MODIS-Retrievals in FESOM für Dezember 2007 bis April 2008.

Mit Hilfe des lückenlosen Datensatzes der FESOM-Felder mit assimilierten MODIS-Eisdicken kann ebenfalls die Eisproduktion berechnet werden. Abbildung 21 zeigt die akkumulierte Eisproduktion für Polynjen mit einer Eisdicke kleiner als 20 cm aus den FESOM-Läufen mit COSMO-5km-Antrieb und Assimilation von MODIS-Dünneisdicken. Der Vergleich mit der COSMO-basierten Berechnung (Abb. 13) zeigt eine gute Übereinstimmung, wobei aber insbesondere für 2007/08 im Bereich der östlichen Laptev-See auch im Vergleich zu C00 eine deutlich höhere Eisproduktion gefunden wird. Diese erhöhte Eisproduktion findet vor allem in einigen sehr schmalen Bereichen entlang der Festeiskante statt. Hier werden Polynjen durch SSM/I oder AMSR-E-Daten oft als zu klein bzw. überhaupt nicht erkannt (Adams et al., 2012). Insgesamt ergibt sich aus den FESOM-MODIS-Berechnungen für 2007/08 mit 76 km³ eine höhere Eisproduktion als für C00 (Tab. 3), für 2008/09 liegt die Eisproduktion zwischen C00 und C10. Ein Problem der FESOM-basierten Eisproduktion liegt darin, dass auch für relativ dickes Eis viel neues Eis produziert wird. Mehr als 40% der Eisproduktion findet bei Eisdicken von 15-20 cm statt, d. h. die Eistrinnen-Parametrisierung von FESOM führt auch in Gebieten mit homogenem Dünneis zu offenen Wasserflächen mit hoher Eisproduktion. Dies zeigt die Notwendigkeit einer Verifikation der Eistrinnen-Parametrisierung mit hochaufgelösten Fernerkundungsdaten und In-Situ-Messungen.

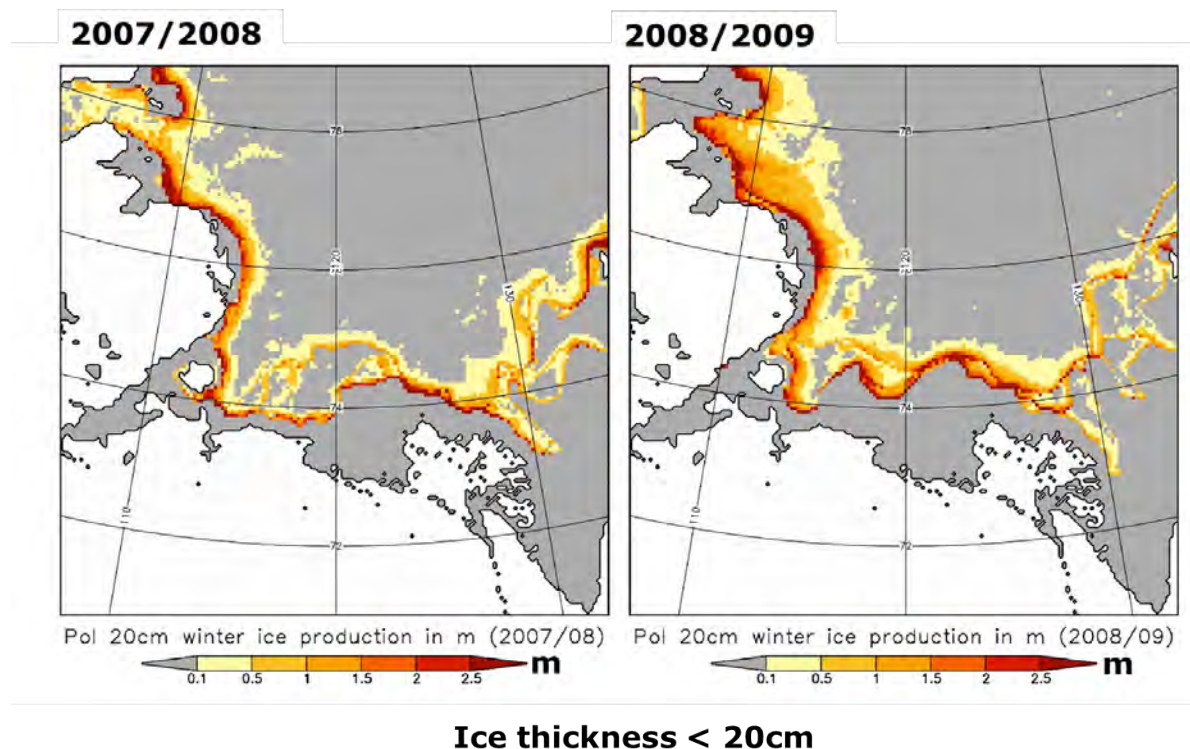


Abb. 21: Akkumulierte Eisproduktion für Polynjen (Eisdicke <20cm) aus den FESOM-Läufen mit COSMO-5km-Antrieb und Assimilation von MODIS-Dünneisicken. Links: Winter 2007/08, rechts: Winter 2008/09.

Gekoppelte COSMO-FESOM- Simulationen

In der Projektphase 2010-12 wurden weitere Anpassungen für das FESOM-Modell vorgenommen. Zum einen wurde zur verbesserten Turbulenzparametrisierung das Louis-Schema (Louis, 1979) zur stabilitätsabhängigen Berechnung der Diffusionskoeffizienten eingebaut. Des Weiteren wurden Sensitivitätsstudien mit der Eisklassenparametrisierung und der Rauigkeitslänge im Zusammenhang mit der neuen Turbulenzparametrisierung durchgeführt. Dabei hat sich gezeigt, dass die ursprüngliche standardisierte Eisklassenparametrisierung (7 Eisklassen je Pixel) für hochaufgelöste Studien (5 km) nicht gut geeignet ist. Diese Eisklassenparametrisierung war ursprünglich für wesentlich geringere horizontale Auflösungen entwickelt worden. Ferner wurden simulierte Oberflächentemperaturen der gekoppelten Simulationen (COSMO/FESOM) und der durch COSMO angetriebenen FESOM-Simulationen mit MODIS-Oberflächentemperaturen verglichen (Abb. 22). In Abbildung 22a sind MODIS-Oberflächentemperaturen für den 30. April 2008 02:20 UTC dargestellt. Die räumliche Verteilung der Temperatur wird am besten von der gekoppelten Modellversion simuliert. In Abbildung 22a/b sind deutlich die erhöhten Temperaturen an der Meereisoberfläche westlich der Polynjen zu sehen, die nur so von der gekoppelten Version simuliert werden können.

Sowohl in der COSMO-Simulation (Abb. 22c) als auch in der durch COSMO angetriebenen FESOM-Simulation (Abb. 22d) ist dieser Effekt nicht zu sehen.

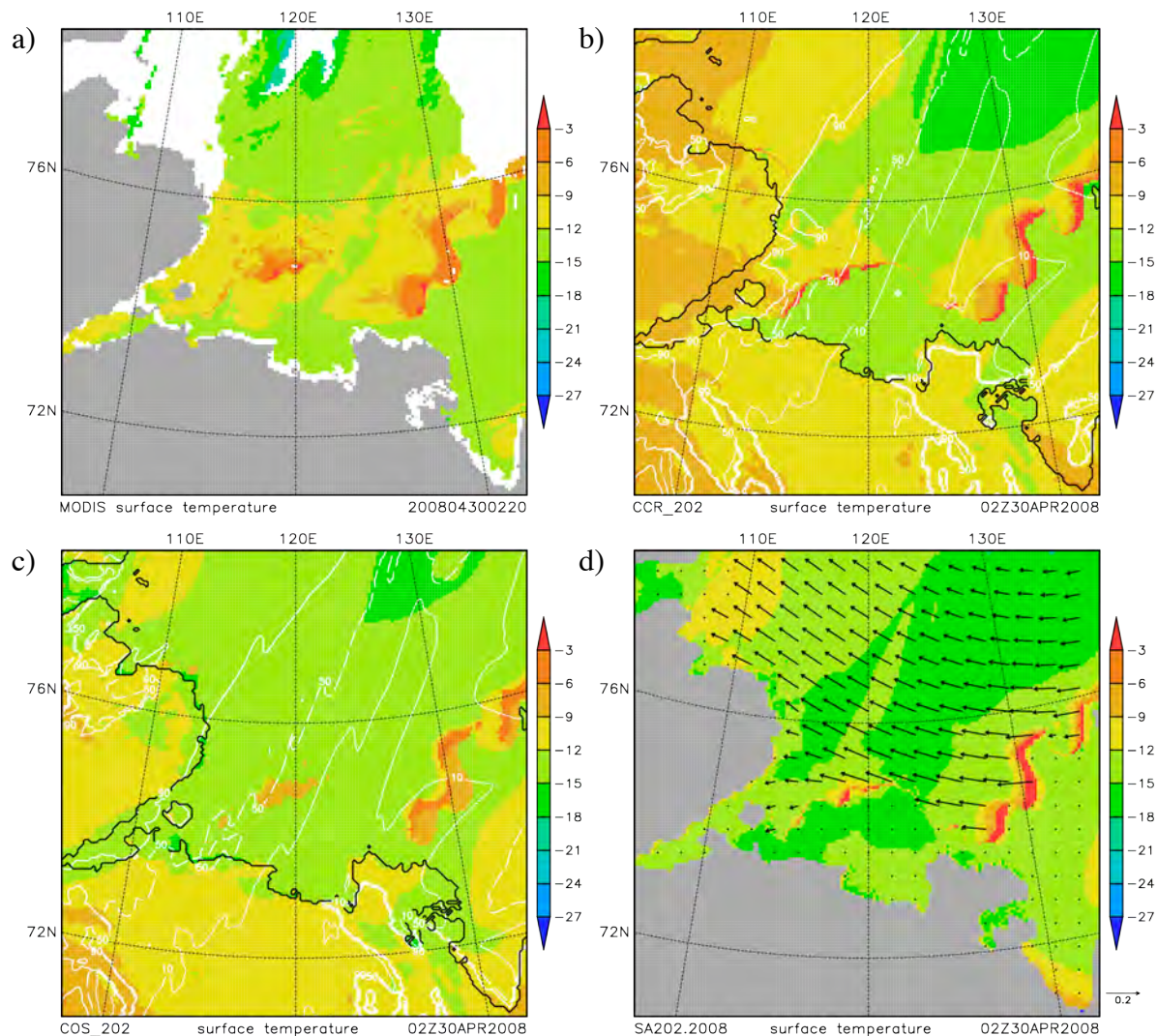


Abb. 22: a) MODIS-Oberflächentemperaturen (°C) für den 30. April 2008, 02:20 UTC; b) Oberflächentemperaturen (°C) eines gekoppelten Laufs (COSMO/FESOM) für den 30. April 2008, 02:00 UTC mit Bewölkungsgrad als 10%-, 50%- und 90%-Konturlinien; c) wie (b), nur COSMO mit thermodynamischem Eismodell; d) Oberflächentemperaturen (°C) einer FESOM-Simulation für den 30. April 2008, 02:20 UTC mit COSMO-Antrieb aus (c), Vektoren stellen die Eisdriftgeschwindigkeit in m/s dar.

Weiterhin ist in Abbildung 22c zu sehen, dass die Temperatur innerhalb der Polynja mit zunehmendem Abstand zur Festeiskante zunimmt. Bei der im COSMO-Modell angenommenen einheitlichen Dünneisbedeckung innerhalb der Polynjen entspricht dies der kontinuierlichen Heizung der atmosphärischen Grenzschicht in der Strömung vom Festeis auf die Polynja. Da im COSMO-Modell auch Meereis eine einheitliche Eisdicke besitzt, sind die Variationen der Oberflächentemperatur über den Meereisflächen relativ gering. Beim gekoppelten Lauf (Abb. 22b) und beim FESOM-Lauf (Abb. 22d) sind Eisbedeckungsgrad und

Eisdicke variabel. Die Zunahme der Dünneisdicke innerhalb der Polynja mit zunehmendem Abstand zur Festeiskante führt zu entsprechenden Gradienten der Oberflächentemperatur.

Insgesamt ergibt sich, dass voll gekoppelte COSMO-FESOM-Simulationen z. T. Vorteile bei der Verteilung der Oberflächentemperatur zeigen, für die Polynja-Dynamik und Eisverteilung zeigen sich nur geringe Unterschiede zwischen der voll gekoppelten Version und dem Antrieb von FESOM durch COSMO.

Experimentelle Untersuchungen

Während der TRANSDRIFT-XIII-Expedition wurden 2012 zwei automatische Wetterstationen (AWS) installiert: an der Festeiskante der WNS-Polynja und auf dem Festeis (Abb. 23). Zusätzlich wurden hochaufgelöste Horizontalprofile der Oberflächentemperatur (Auflösung 4 m) über der Polynja mittels eines KT15-Infrarotthermometers gemessen.

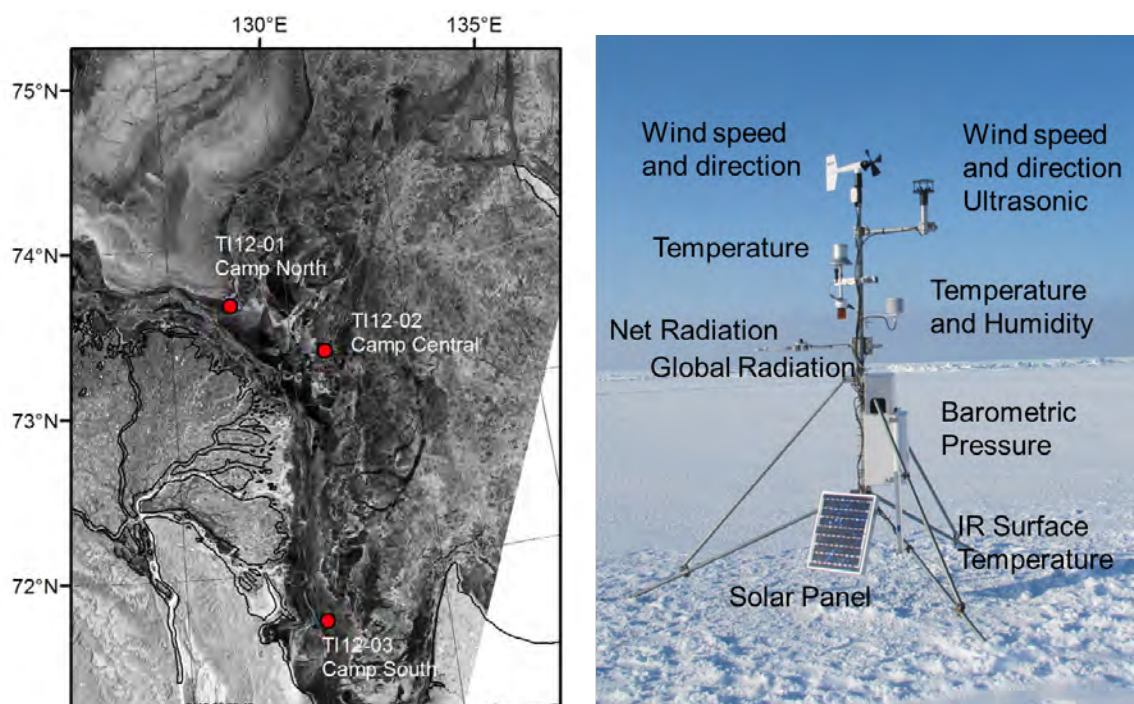


Abb. 23: Positionen der Stationen 2012. AWS wurden bei Camp North und Camp South installiert (© Krumpen, 2012) (links); AWS mit Instrumentierung (rechts).

Einen Überblick über die meteorologischen Bedingungen der Winterkampagne 2012 gibt Abbildung 24. Über dem Festeis bei Camp South zeigen sich generell eine größere Tagesamplitude der Temperatur und deutlich geringere Windstärken als in der Nähe der Polynja.

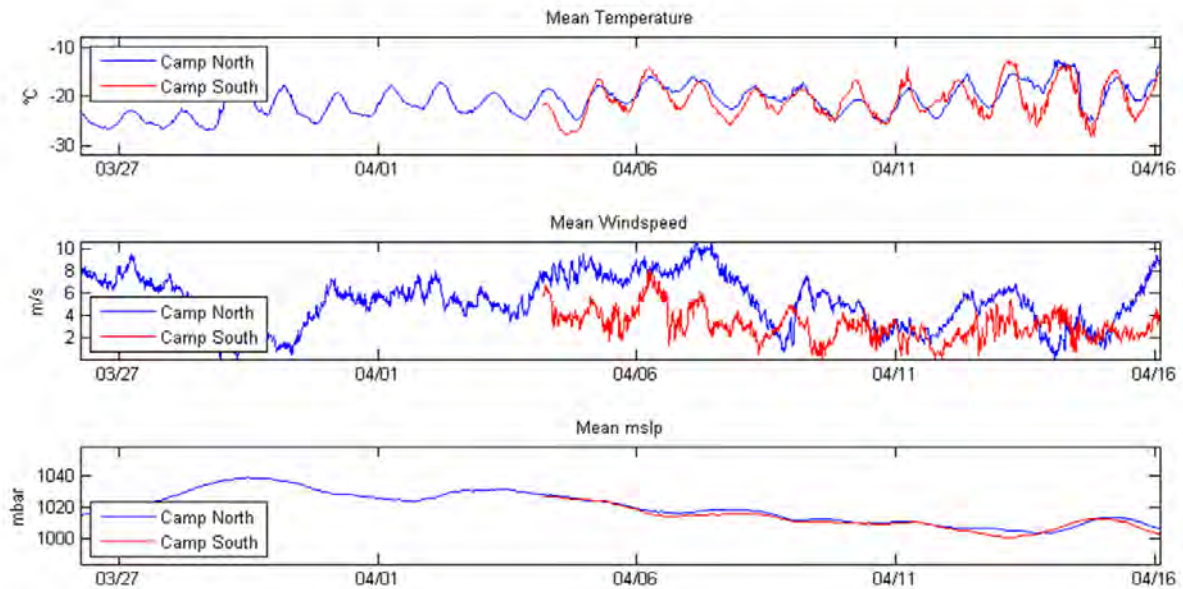


Abb. 24: Messungen der AWS an Camp North und Camp South vom 26.3.-16.4.2012.

Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die aus dem Projekt resultierenden Ergebnisse sollen wie folgt genutzt werden:

Publikationen

Artikel in begutachteten Zeitschriften, Publikation von Ergebnissen und Berichten im Internet, Austausch der Ergebnisse national/international, Präsentation auf Konferenzen. Zahlreiche Ergebnisse des Teilprojektes wurden 2011 bzw. 2012 publiziert. Ergebnisse wurden z .B. auf folgenden Tagungen vorgestellt: Tagungen der European Geophysical Union (EGU) in Wien 2010 und 2011, Konferenz des World Climate Research Programme (WCRP) in Denver 2011, Konferenz im Rahmen des International Polar Year (IPY) in Montréal 2012, International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) in München 2012, Konferenz der European Space Agency in Frascati 2012, Konferenz der American Geophysical Union (AGU) in San Francisco 2012, Arcticnet-Konferenz in Vancouver 2012.

Validierungsdatensätze und Antriebsdaten

Langzeitliche Datensätze der Dynamik der Laptev-See-Polynja aus Satelliten-Beobachtungen und atmosphärische Daten (Messdaten, GME, COSMO) wurden für andere Teilnehmer des Verbundvorhabens zur Verfügung gestellt und für zahlreiche Studien genutzt. Die Polynja-

Daten wurden in PANGAEA publiziert (<http://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.793229>). Die Daten können auch zur Verbesserung und Validierung von bestehenden regionalen Klimamodellen und Meereis/Ozean-Modellen in der Arktis (z. B. AWI-Bremerhaven, AWI-Potsdam, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg) verwendet werden.

Modellentwicklungen

In der Projektphase 2010-2012 wurden neue Parametrisierungen für das FESOM-Meereismodell implementiert und getestet. Diese Verbesserungen werden dem AWI zur Verfügung gestellt.

Weitere Nutzung

Ansprechpartner für eine Nutzung der Projektergebnisse sind neben dem DWD auch der russische Wetterdienst (Roshydromet), Wetterdienste der nordischen Staaten sowie Forschungsgruppen, die sich mit Klima- und Ozean/Eis-Forschung und Klimaprognosen in der Arktis befassen. Die Abschätzung der Eisproduktion ist für das Verständnis des arktischen Klimasystems von großer Bedeutung.

Alle vorhandenen Eiskarten werden in regelmäßigen Abständen in ein Datenarchiv eingespeist und können über Online-Zugriff von allen Projektteilnehmern eingesehen werden (<http://klima-uni-trier.de/laptev/lssv/start.php>).

Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Meereisfernerkundung

Passive Mikrowellensensoren stellen die am häufigsten genutzte Quelle für die Ableitung von Meereis-Kenngrößen dar. Der Special Sensor Microwave Imager (SSM/I) und das Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR-E) liefern seit 1987 bzw. 2002 täglich Strahlungstemperaturen der Oberfläche im Mikrowellenbereich. Auf Basis dieser Strahlungsmessungen werden operationell und flächendeckend für die Arktis Meereiskonzentrationen auf einem 25-km-Gitter (SSM/I; Cavalieri et al., 1996; Meier et al., 2006) bzw. 6,25-km-Gitter (AMSR-E; Spreen et al., 2008) bereitgestellt, die in zahlreichen anderen Studien z. B. zur Validation von Meereismodellen verwendet werden. Die im Projekt benutzte Methode zur Ableitung von Polynja-Eigenschaften aus Strahlungstemperaturen im Mikrowellenbereich in Form der Polynja-

Klassifikationsmethode (Polynya Signatur Simulation Method, Markus & Burns, 1995) wurde von Kern (2009, 2008) verwendet, um eine langjährige Polynjadynamik für die Karasee und für die Antarktis zu erstellen. Weiterhin zeigte sich in mehreren Studien, dass sich die Eisdicke von dünnem Eis (0-20 cm) aus Mikrowellen-Strahlungstemperaturen bestimmen lässt (z. B. Martin et al., 2004; Tamura et al., 2007). Eine Methode zur Identifikation von Eistrinnen aus AMSR-E-Daten wurde von Röhrs et al. (2012) veröffentlicht und in die aktuellen Auswertungen mit einbezogen.

Eine für das Vorhaben relevante Publikation war im Jahr 2011 die Studie von Tamura und Ohshima (2011), die Ergebnisse zur Eisproduktion in der Laptev-See aus Mikrowellen-Fernerkundung zeigt. Mit dem Autor T. Tamura wurden eine lebhafte Diskussion und der Austausch von weiteren Ergebnissen begonnen. Die Eisproduktion in der Laptev-See nach Tamura und Ohshima (2011) zeigt deutlich höhere Werte als dies nach unseren Ergebnissen der Fall ist. Da wir zwei unabhängige Methoden verwenden (Satellitendaten mit Energiebilanzmodell, mesoskalige Modellierung), die untereinander konsistente Resultate zeigen, können die Unterschiede in der Polynjafläche, der Dünneisdicke oder in dem von Tamura und Ohshima verwendeten Energiebilanzmodell liegen. Da erstens die Bestimmung von Dünneisdicken aus passiven Mikrowellendaten (SSM/I bei Tamura und Ohshima) mit großen Unsicherheiten behaftet ist und da zweitens die passiven Mikrowellen-Verfahren bei winterlichen Polynjen mit relativ großer Dünneisdicke fehlerhafte Polynjaflächen liefern können, haben wir neue Projektschwerpunkte bei der Fehleranalyse der Dünneisdicken und der modellbasierten Erstellung von konsistenten und kontinuierlichen Dünneisdicken-Verteilungen gelegt.

Mesoskalige Atmosphären-Meereis-Modellierung

Die atmosphärischen Antriebsfelder aus den globalen Reanalysen (NCEP oder ECMWF) weisen eine geringe räumliche Variabilität für ein Gebiet von der Größe der Laptev-See auf, so dass mesoskalige Antriebe auf die Bildung von Polynjas in dieser Region nicht berücksichtigt werden. Für den Bereich der Arktis werden zurzeit neue, hochaufgelöste Reanalysen im Rahmen des Projekts “Arctic System Reanalysis” (ASR) für den Zeitraum 2000-2010 mit dem WRF-Model (Weather Research and Forecasting Model) mit 10-30 km Auflösung erstellt (Bromwich et al., 2010, 2011). Die erste Version ASR (Arctic System Reanalysis)-Interim (30-km-Auflösung) ist ab Februar 2013 verfügbar, ASR-Daten mit 15-km-Auflösung ab Mai 2013. Mit diesen Daten können die COSMO-Simulationen der Eisproduktion verglichen werden.

